HAL
open science

Le destin des formalismes : à propos de la forme des plantes - Pratiques et épistémologies des modèles face à l'ordinateur

Franck Varenne

▶ **To cite this version:**

Franck Varenne. Le destin des formalismes : à propos de la forme des plantes - Pratiques et épistémologies des modèles face à l'ordinateur. Histoire. Université Lumière - Lyon II, 2004. Français. NNT : . tel-00008810v2

HAL Id: tel-00008810

https://theses.hal.science/tel-00008810v2

Submitted on 18 Mar 2005

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Université Louis Lumière – Lyon 2

Faculté de Géographie, Histoire, Histoire de l'Art, Tourisme

Ecole Doctorale de Sciences Humaines et Sociales

Thèse présentée par M. Franck Varenne

pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université de Lyon 2

Discipline : Histoire

Le destin des formalismes : à propos de la forme des plantes

Pratiques et épistémologies des modèles face à l'ordinateur

Directeur de thèse : M. le Professeur Girolamo Ramunni

Soutenue publiquement le 29 novembre 2004 devant le jury composé de :

Monsieur Serge Chassagne (Professeur à l'Université de Lyon 2)	Président
Monsieur Daniel Parrochia (Professeur à l'Université de Lyon 3)	Rapporteur
Monsieur David R. C. Hill (Professeur à l'Université Blaise Pascal)	Rapporteur
Monsieur Girolamo Ramunni (Professeur à l'Université de Lyon 2)	
Monsieur Claude Debru (Professeur à l'Ecole Normale Supérieure - Ulm)	
Madame Anne-Françoise Schmid (Maître de conférences à l'INSA de Lyon)	
Monsieur Francis Hallé (ancien Professeur à l'Institut de Botanique de Montpellier, Montpellier 2)	

Tome : 1/3

À ma femme

Sommaire

Avant-propos
Introduction générale
Remerciements
Première époque : le déracinement
Deuxième époque : la dispersion
Troisième époque : la convergence
Conclusion générale
Bibliographie
Annexes
Index des noms
Table des encadrés
Table des matières

AVANT-PROPOS

De nombreuses histoires des concepts scientifiques et certains travaux d'histoire des idées au 20ème siècle ont montré que la croyance en des idéologies comme en des théories unitaires est révolue. L'époque serait désormais aux modèles, à leur relativité, à leur modestie, à leur caractère pragmatique. La simplicité biblique d'une théorie unitaire, monarchique et monolithique ne serait plus à l'ordre du jour. Et la multiplicité des secteurs de la science comme de ses méthodes, sa « désunité » même en attesteraient. Certes, avec Bruno et Galilée, mais aussi avec Spinoza, Kant, Hegel, puis Comte, le dieu de Descartes, incompréhensible et libre, est définitivement tombé sur la terre. Il est devenu la nature. Et en tombant, il s'est coupé en deux, en quelque sorte. À nous les hommes, l'infinie liberté, mais à la nature, l'infinie incompréhensibilité. La transcendance est désormais de ce monde. Nous y participons ; mais nous n'y avons pas accès directement. Nous devons la travailler au corps. Nous sommes ainsi infiniment libres d'organiser une nature qui dépasse pourtant notre pouvoir de compréhension et d'intellection : c'est précisément là que naît la *méthode des modèles*, à l'orée du 20ème siècle, dans ce lieu où la modestie et le narcissisme de l'homme contemporain se côtoient étrangement. L'homme sans qualités est l'homme contemporain, dit-on. C'est l'homme des possibles, des fictions probables, sans attache immuable, déraciné donc.

Nous dirions que c'est surtout l'homme des *divers modèles possibles* d'une nature à laquelle il participe sans pour autant la comprendre. Héritier d'un judéo-christianisme sans dieu, l'homme contemporain et, en l'espèce, le scientifique, est placé devant l'interdit de toute représentation de l'incompréhensible que lui est désormais la nature, et donc aussi sa nature. Arrangeant ses pratiques avec sa conscience, l'homme devient résolument positif. Plus précisément, il devient positiviste. Déraciné du réel dans ses représentations comme dans ses concepts, il apprend à assumer progressivement la diversité et la dispersion des formulations du monde. Le monde n'est plus *écrit* en un langage géométrique : cette voix passive disait trop la confiance en l'activité antérieure d'une voix, d'un *fiat*, d'un Verbe premier qui n'a qu'à dire les

choses pour qu'elles soient. Mais c'est à l'homme d'*écrire* activement le monde, en un langage mathématique aussi, il est vrai, mais en un langage dont ni le style ni la formulation ne sont déterminés *a priori*. Là est toute la différence. Ainsi, le formalisme ne s'enracine plus dans le réel. Mais il vient d'une proposition de celui qui pense et travaille ce réel. Si ce n'est plus la fidélité de la représentation scientifique formelle, sa vérité, qui est la valeur ultime, ce sera donc son économie (Mach) ou sa commodité (Poincaré, Duhem). La dispersion stylistique devient de fait la règle dans l'écriture des formalisations contemporaines de la nature. Cette dispersion, cette désunité formelle sont aujourd'hui encore incontestables.

Pour autant, en ce début du 21ème siècle, nous apercevons des signes qui semblent annonciateurs d'une transition vers une autre époque. L'ordinateur, après avoir fait le jeu de cette dispersion et l'avoir même amplifiée, semble par moments tendre à nous faire dépasser le pragmatisme du modélisme perspectiviste et ce d'une manière inédite. **Après une époque de déracinement et de dispersion, assisterait-on à l'aube d'une convergence ?**

Disons d'emblée que cette convergence n'a rien à voir avec un retour à la confiance antérieure en un formalisme vrai et monoaxiomatisé. Comme leurs contemporains, les modélisateurs assument le perspectivisme et la diversité des formalismes. Mais les rapides développements matériels et logiciels de l'ordinateur les ont conduits à dépasser le perspectivisme utilitaire sans pour autant les faire revenir au rêve d'une théorie unitaire et essentialiste. Car c'est en aval et non en amont que la jonction s'opère : d'où le choix de notre terme de *convergence*. L'ordinateur peut désormais devenir le support d'un modèle pluriformalisé, après coup, et à multiples fonctions. C'est même seulement lorsqu'il intègre ensemble plusieurs formalisations, et donc plusieurs points de vue formalisés qui ont été constitués par ailleurs, que le modèle est calibrable et qu'il devient utilisable. Ce faisant, il ne *représente* plus la réalité de manière formelle. Il n'en est plus une projection opératoire et partielle, une *représentation* en ce sens, mais il la *simule* de manière concrète car il la réplique le plus fidèlement possible par rapport aux *diverses* expériences que l'on en peut avoir. Une convergence autour de simulations restituant leur complexité aux objets a pu alors se faire jour entre formalismes différents et par conséquent aussi entre certaines approches et certaines disciplines naguère désunies.

Si le constat d'une telle convergence s'avère, c'est à un bouleversement considérable dans l'organisation de la science elle-même que l'on assiste. Et c'est peut-être même le signe avant-coureur d'une mutation d'importance dans l'esprit du temps. La règle du perspectivisme (se faire un modèle du monde selon son point de vue et selon ses objectifs) serait-elle parvenue à l'épuisement ? De fait, elle semble parfois aujourd'hui dépassée ou, à tout le moins, contournée par les nouvelles possibilités qu'offrent les dispositifs de computation et de simulation.

Il est à noter cependant que ce phénomène récent semble avoir affecté très diversement les secteurs de la science. Un certain nombre d'entre eux disposent déjà de théories formelles ou de modèles théoriques assez généraux, comme la physique. Ceux-là n'ont pas eu essentiellement besoin de simulation par ordinateur pour naître et se développer, même s'ils recourent aujourd'hui abondamment à l'ordinateur et même si c'est en physique que la simulation *numérique* est née. On observe que c'est plutôt dans d'autres domaines, où la quête d'un formalisme semblait désespérée, que la pluriformalisation soutenue par une simulation *informatique* s'est imposée au cours des années 1990. Nous nous attacherons donc à rapporter et à comprendre **comment l'ordinateur a rencontré, amplifié puis commencé d'exorciser la dispersion des formalismes** dans des secteurs où la science peinait jusque là à formaliser les phénomènes. C'est notamment le cas des sciences de la vie et de l'environnement. Un de ses sous-domaines nous a semblé ouvrir la voie : c'est celui de la modélisation de la croissance et de la forme des plantes.

INTRODUCTION GENERALE

De manière à aborder la problématique que nous nous sommes fixée, notre travail a procédé d'une série de choix précis qu'il nous faut dans un premier temps éclairer et justifier. Seulement alors, nous serons à même d'expliquer l'esprit de notre approche, puis le choix des sources, des documents et des matériaux que nous avons sollicités, et enfin notre méthode d'exposition.

Choix de l'objet

En conformité avec la science contemporaine, l'histoire des sciences ne présente pas elle-même une méthodologie unique et se déploie selon plusieurs points de vue. Elle peut être écrite par des historiens, des philosophes ou des sociologues. Toutefois, après avoir été fortement philosophique et conceptuelle, l'histoire des sciences, même quand elle est écrite par des philosophes, tend à devenir aujourd'hui plus historienne. Sous l'impulsion de l'Ecole des Annales comme des *Social studies*, mais sans négliger les options philosophiques et épistémologiques que toute pratique scientifique draine avec elle, cette histoire étudie davantage la science comme une pratique sociale parmi d'autres, enracinée dans un contexte matériel et insérée dans des rapports économiques et sociaux. Cette approche, intégrative, devient dès lors plus complexe. Elle commande qu'on prenne conscience des diverses dimensions que ce phénomène social présente. On ne peut plus prétendre rendre compte de l'évolution de la totalité d'une pratique scientifique dans chacun de ses aspects, en même temps, et sous le regard d'une unique problématique. Il nous faut faire des choix. Cependant, et il est important de le noter, il n'est pas nécessaire de se cantonner à une seule de ces dimensions que les historiens nous ont progressivement appris à voir, qu'elle soit technique, technologique, philosophique, conceptuelle, sociologique ou institutionnelle. Le choix que l'on doit faire peut en effet procéder d'une thématisation transversale et pluridimensionnelle qui présente l'avantage de conserver leur épaisseur aux faits historiques. On peut ainsi croiser ces divers aspects, en rendre compte simultanément au cours du temps, mais à condition de restreindre l'étendue de l'objet qui oriente notre enquête historique.

Pour dire très schématiquement les choses, il est possible en effet de considérer que l'historien des sciences et des techniques a aujourd'hui le choix entre au moins huit orientations pour diriger ses recherches et circonscrire son propos. Il peut se laisser orienter prioritairement par le devenir d'un objet d'étude (ex : la lumière, le son, la neurotransmission), d'un instrument (ex : le baromètre, la pompe à air), d'un objet technique ou d'une technologie (ex : la machine à vapeur, l'informatique), d'un concept ou d'une théorie (ex : l'allométrie, la physique quantique), d'une discipline (ex : les sciences de la vie, la biologie moléculaire), d'une pratique technique et/ou cognitive (ex : l'écriture, la mémorisation, le calcul), d'une institution (ex : le CNRS, l'INRA) ou enfin d'une personne (ex : Marie Curie, Albert Einstein). Il peut bien sûr coupler deux ou trois de ces orientations (ex : l'informatique au CNRS), mais guère plus. Pour notre part, nous avons choisi de rendre compte des traitements formels de la forme de la plante individuelle. Nous nous sommes donc orienté selon un « objet d'étude » : la forme de la plante et ses approches mathématisées ou, plus largement, formalisées. Nous appellerons ici formalisme, ou formalisation, tout type de traduction graphique, symbolique, mathématique ou informatique qui permette ensuite une manipulation opératoire de cette seule forme, indépendamment de ce qu'elle traduit et par quelque sorte de calcul que ce soit. Moyennant cette précision préalable, pour quelles raisons avons-nous décidé de nous pencher plus particulièrement sur cet objet d'étude scientifique « formalisation de la forme des plantes » ?

La première et principale raison qui a présidé à notre choix vient du résultat d'une première série de sondages effectués au début de nos recherches. Nous nous étions alors fixé l'objectif assez large de travailler sur l'évolution des méthodes de modélisation et de simulation dans les sciences de la vie et de l'environnement face à l'émergence de l'ordinateur. Ayant dépouillé les livraisons récentes (1995) de la *Revue d'Ecologie* comme de la *Revue Forestière Française* portant sur le thème de la modélisation ainsi que les actes complets du colloque CNRS - *Tendances Nouvelles en Modélisation pour l'Environnement* de janvier 1996 (et non seulement la sélection des interventions qui a été publiée), nous n'avons pu que constater, à côté de l'habituelle dispersion des thématiques proposées, l'indication réitérée d'un début de convergence de différentes problématiques (de foresterie, arboriculture, agronomie, botanique ou écophysiologie) autour des techniques de simulation individu-centrées de l'architecture des arbres et de la plante en général. Certains des auteurs concernés parlaient même d'« expérimentations agronomiques virtuelles ». De surcroît, au vu des bibliographies, cette convergence indiquait sans ambiguïté une source unique dans une série de travaux ayant pris leur essor dans des institutions de recherche françaises comme le CIRAD et l'INRA. Enfin, d'autres sondages effectués dans des revues plus internationales et de langue anglaise nous montraient que l'emphase sur les travaux de cette équipe française n'était pas le seul effet d'un chauvinisme excessif. Ils étaient bel et bien relayés partout dans le monde, en particulier au Canada, en Allemagne et en Finlande. Ils tendaient même à devenir une sorte de référence ou de standard, au sens conceptuel comme au sens logiciel de ce dernier terme. En cette fin des années 1990, il se passait donc indéniablement quelque chose dans les méthodes de modélisation environnementale et dont la France était de plus un théâtre privilégié. Comme nous avions le projet d'interroger des acteurs, la commodité de les avoir présents sur le sol français et la plus grande accessibilité (supposée !) des documents nous a donc rapidement confirmé dans l'idée d'opter pour cette étude de cas. Face à notre problématique, la question devenait celle-ci : comment en est-on arrivé à dire que l'on pouvait faire des « expérimentations agronomiques virtuelles » ? Comment cette école de simulation architecturale de la plante avait-elle pu voir le jour ? Qu'est-ce qui, dans les techniques informatiques récentes, a

modifié suffisamment la donne pour que se fédèrent nouvellement certaines disciplines naguère dispersées ?

La deuxième raison qui nous a fait porter notre choix sur le devenir des formalisations de la forme des plantes vient du fait qu'il nous est rapidement apparu que son histoire était à la fois ancienne, riche, de souffle assez long et encombrée de tentatives avortées. Le caractère de prime abord très peu anarchique de la forme de la plante et le fait qu'elle semble révéler une systématicité ou une harmonie ont pourtant très tôt suscité des tentatives de représentations stylisées voire d'authentiques formalisations mathématiques, notamment pour sa phyllotaxie (arrangement mutuel des feuilles). Mais si certains caractères morphologiques pouvaient être rapidement stylisés et mesurés, les outils mathématiques développés essentiellement en mécanique et en physique se révélèrent inaptes à rendre compte de la morphogenèse dans sa totalité et dans sa dynamique, tout au moins jusque dans les années 1970. *A priori*, il y avait donc là matière à saisir, de façon ralentie et sans doute avantageusement grossie pour l'œil de l'historien, les débats complexes sur la mathématisation ou la représentation formalisée des phénomènes qui y répugnent, comme c'est souvent le cas dans une science que l'on peut dire non-exacte, telle que la biologie. Notons tout de suite ici que cette expression « non-exacte » qualifiera pour nous les sciences de la vie et de l'homme, en général, dans la mesure où elles ont spécifiquement affaire à une variabilité apparemment irréductible, donc à des aléas, mais aussi à une hétérogénété intrinsèque forte, comme à une complexité inédite dans les changements d'échelle, cela par contraste avec la mécanique rationnelle, par exemple.

De plus, cette histoire particulière, d'abord lente, patiente, multiforme et colorée, semblait bien avoir connu récemment, c'est-à-dire dans la période contemporaine qui nous intéresse, une accélération inédite grâce au développement de la simulation sur ordinateur. La simulation numérique issue de la physique nucléaire et qui, entre-temps, tendait à devenir simulation informatique (simulation plus « réaliste » autorisée par l'assouplissement considérable et le caractère plus intuitif des langages informatiques) semblait progressivement, et pour la première fois, rassembler les suffrages et unifier les modélisateurs du végétal autour d'une méthode, non sans heurts, il est vrai. Là plus qu'ailleurs sans doute, nous avions donc des chances de découvrir quelque chose comme une mutation raisonnablement avérée dans les pratiques contemporaines de modélisation, cela en lien avec notre problématique générale.

La quatrième raison est la relative stabilité de cet objet d'étude et donc la possibilité de s'orienter véritablement par rapport à lui, d'en faire un fil directeur, un critère pour l'enquête et les choix de documents. À cette condition, l'enquête historique suivie devient réalisable en effet. Alors qu'il est en revanche presque impossible de faire une histoire des formalisations de l'objet d'étude « atome » dans la physique contemporaine sans évoquer en même temps le caractère problématique de son abord, de son existence même, et donc la nécessaire dialectique entre les différentes évolutions des instruments, des modèles et des théories, dans le cas de cet objet macroscopique qu'est la forme de la plante en revanche, ce que l'on vise à travers lui garde une certaine stabilité car une certaine réalité, au sens du réalisme naïf. Il serait par exemple plus incongru de parler ici d'une construction sociale de la plante alors que cela conviendrait mieux peut-être pour l'atome. Même si on ne la perçoit pas de la même façon, même si on ne lui donne peut-être jamais le même sens, la forme de la plante reste une réalité à laquelle on peut toujours faire immédiatement face (c'est-à-dire sans instrument) et ce de manière stable du point de vue diachronique.

Le choix de focaliser notre attention sur cet « objet d'étude scientifique » au cours du 20ème siècle ne nous dispensait pourtant pas de prendre en compte le fait que sa résistance persistante

à la formalisation a imposé des dialogues interdisciplinaires permanents puisque, résistant aux assauts des théories et des modèles de diverses natures, il est demeuré aux frontières entre physique, biologie, mathématiques et informatique. Notre enquête porte donc sur un sous-secteur de la science mal défini dans ses limites (la modélisation de la croissance et de la forme des plantes) car manquant de cohérence par rapport aux autres disciplines mieux constituées, bien que, pour certains chercheurs, cette discipline soit justement aujourd'hui en voie de constitution. Cette interdisciplinarité de notre champ d'étude n'est pas la moindre des difficultés que nous avons rencontrées. Une telle incohérence et une telle dispersion risquaient de rejaillir sur l'intrigue historique elle-même si nous n'avions donc pris le soin de nous orienter selon l'objet.

Une autre difficulté tenait à notre choix de suivre le devenir d'un objet d'étude jusqu'aux années les plus contemporaines. Or, cette histoire n'est pas finie pour nous qui prenons le risque de commencer à l'écrire dès aujourd'hui. Cette objection est forte. Car nous sommes en face d'une séquence de faits et d'événements dont on ne peut être certain *a priori* de pouvoir saisir la trame globale ou le sens général. Il nous est ainsi impossible de décider dès maintenant quelles seront les techniques qui seront encore approuvées et pratiquées dans les prochaines années. Nous répondons cependant que cette difficulté reste grande si l'on prétend saisir déjà l'enveloppe externe, la forme générale et sensée de tout un mouvement de mutation à l'œuvre dans une séquence de l'histoire des sciences et des idées. Or, notre ambition a été plus modeste. Fils de notre temps, nous même, il ne nous a pas été si difficile de faire l'hypothèse méthodologique que nous ignorions *a priori* où le présent nous mène. Nous nous sommes donc simplement astreint à rapporter une allure, un mouvement tel que l'on peut le ressentir de l'intérieur, sa différentielle en quelque sorte. Or, il y a un fait de mutation incontestable, nous l'avons dit : « Quelque chose se passe dans la modélisation des plantes. » Et on peut d'ores et déjà le ressentir par l'effort d'une histoire interne comme d'une histoire institutionnelle, notamment avec des faits comme le regroupement précipité, précoce et non forcé de différentes équipes de recherche autour d'une Unité Mixte de Recherche désormais polycéphale. Percevoir et donner à percevoir, dès aujourd'hui, un mouvement ou une tendance n'est donc pas ambitionner de proposer d'emblée une téléologie. Dans le cas de notre objet d'étude, donner le sens du présent par rapport au passé et non en vue du futur nous a ainsi semblé possible. Et donner à percevoir comment l'on se meut aujourd'hui n'est pas encore promettre de donner à voir où l'on va.

Toutefois, il se pourrait *a priori* que le cas des plantes soit exemplaire pour le futur très prochain d'autres champs de la science. Au vu des premiers sondages que nous avons effectués par ailleurs, notamment dans ces autres sciences dites non-exactes que sont les sciences humaines, la modélisation des plantes semble être entrée, une des premières, dans l'ère des convergences alors que bien d'autres champs en restent à la dispersion des méthodes. Mais quant à cette exemplarité supposée, il ne sera en fait rien décidé dans cette étude. Le travail à fournir pour la vérifier en excédait tout simplement le cadre.

Le type d'approche

Le choix de l'objet et de la thématique étant justifié, qu'est-ce qui a déterminé l'esprit de notre approche ? Comme l'indique notre problématique générale, nous avons voulu suivre un destin particulier des formalisations dans les sciences non-exactes afin de mesurer ce que l'ordinateur y a réellement apporté et afin de tester notre hypothèse d'une convergence inédite autour de la simulation informatique. Notre travail s'inscrit donc d'abord dans une perspective d'histoire des sciences et des techniques. Nous y serons ainsi particulièrement sensible à

l'évolution des concepts et des techniques informatiques comme à celle de certains concepts mathématiques dans leur rapport d'application à la forme et à la croissance des plantes. À cette fin, nous tenterons d'établir assez précisément la nature des différents domaines et des différentes problématiques scientifiques concernés et leur évolution. Nous serons plus particulièrement vigilant à l'égard des filiations intellectuelles, des ruptures, des novations et des oppositions. En restant attentif à toutes ces dimensions, nous observerons de près l'état du domaine peu avant, pendant et peu après l'émergence de l'ordinateur, c'est-à-dire jusqu'à nos jours (2003). Pour chaque épisode, nous nous interrogerons sur la nature de la formalisation adoptée, ou construite pour l'occasion, et sur le rôle épistémique que les auteurs lui donnent. Ainsi, nous tâcherons d'élucider, dans leur contexte, le rôle joué par les mathématiques ainsi que le statut conféré aux lois formelles puis aux modèles, à partir du moment où ces derniers commenceront à être acceptés comme tels. Enfin, nous mettrons à chaque fois en lumière le rôle précis conféré à l'ordinateur s'il y a lieu.

Nous entendons ici par « rôle épistémique » ce que le scientifique déclare explicitement au sujet de ce que telle approche ou telle technique ou tel instrument lui apporte précisément en matière de connaissance. Cela désigne la nature précise et assumée d'une source de connaissance telle que le scientifique la vit et la conçoit consciemment, par contraste avec la nature d'autres sources de connaissances qu'il connaît et maîtrise aussi. Ce peut être par exemple des « arguments » qualifiés par lui de « théoriques », des « calculs » ou des « données expérimentales ». C'est donc sa compétence technique sur la nature et la valeur relatives des sources de savoir dont il dispose. En ce sens, le rôle épistémique d'une source de savoir est à distinguer de l'épistémologie générale du scientifique qui, elle, peut être vécue implicitement et de manière non revendiquée. La reconnaissance d'une épistémologie nécessite une approche plus *compréhensive*, accès sur les idéaux-types que l'auteur met en œuvre de manière plus indirecte et souterraine. Néanmoins, elle reste parfois très accessible. La reconnaissance du rôle épistémique d'une technique, pour un scientifique donné, nécessite en revanche une *explication* fine de ses méthodologies explicites, comme des usages qu'il fait de ses outils, formels ou matériels, ou de ses instruments. Elle touche aux pratiques effectives et conscientes de l'acteur.

Cette approche mixte, à la fois explicative et compréhensive, nous semble nécessaire car c'est un fait que l'histoire de ces formalismes, tout au moins à ses débuts, reste surtout celle de conceptions théoriques et ne rencontrant pour ainsi dire jamais le verdict de l'expérience contrôlée. Ne nous le cachons pas plus longtemps : beaucoup des formalismes dont il sera question ici sont restés longtemps de pures spéculations dont il est difficile de comprendre l'émergence en leur temps si on ne la rapporte à tout un contexte d'histoire des idées, plutôt qu'aux seuls contextes technique, institutionnel, sociologique ou pragmatique. Nous avons le plus souvent affaire à des chercheurs isolés qui essaient des formalisations, mais sans grand succès et sans lendemains immédiats. Les réseaux institutionnels auxquels nous a habitué la science physique contemporaine, autour de ses grands instruments notamment, n'ont donc pas tant de prise dans le cas qui nous intéresse. Comme jadis dans le berceau de la science physique classique, ce sont alors les motivations philosophiques, voire ontologiques, qui prennent de nouveau le pas. Nous n'avons donc pas cru devoir nous passer d'un recours à une approche conjointe d'histoire des idées et d'histoire de la philosophie quand le besoin s'en faisait sentir, cela d'autant plus que nombre de ces scientifiques nous y engageaient d'eux-mêmes à travers leurs écrits, leurs arguments et leurs bibliographies. Bien souvent, des épistémologies ou des formalismes sont préférés d'abord au nom d'options philosophiques ou ontologiques indirectement repérables, voire explicitement avouées. De par la nature même de l'objet qui la concerne, notre étude doit donc

aussi adopter la perspective d'une histoire intellectuelle sans que trop d'importance, ni même une quelconque priorité de principe lui soient pour autant définitivement données.

Car il est aussi un fait que, par la suite, au cours de la période que nous étudions, cet enracinement dans des options ontologiques ou épistémologiques sera bien moins décisif pour l'évolution des méthodes, des pratiques et des concepts. Dès lors que les formalismes se pratiquent, que la nature y répond d'une manière contrôlable, que les hommes et leurs activités se fédèrent autour, les options épistémologiques sont bien souvent mises à mal. Elles passent au second plan. Ce qui démontre que les motivations philosophiques sont bien loin d'être toujours déterminantes, si elles le sont parfois, en histoire des sciences. Au cours de notre période, nous serons donc amené à entrelacer différemment les rôles respectifs des spéculations et des conceptions techniques et technologiques : il se révèle que leur rôle n'est pas fixé une fois pour toutes et indépendamment de l'état d'avancement des conceptions et des pratiques de notre objet d'étude.

Faut-il donc changer de méthode d'exposition chaque fois que nous observons une légère mutation et que nous changeons d'époque ? La cohérence et l'unité de notre approche en seraient vite menacées. Il est en fait possible d'éviter ce cercle vicieux qui nous guette : l'objet historique déterminant une méthode qui elle-même déterminerait une attention à un objet historique. Si l'on se fie à une lecture serrée des documents, on s'aperçoit très vite que le modèle quitte la spéculation et entre dans un régime de légitimation différent à partir du moment où il est calibré, puis qu'il entre dans un autre régime encore à partir du moment où il est couramment utilisé. Même alors, dans ce cas, il reste intéressant de se pencher sur les motivations épistémologiques résiduelles et proclamées des acteurs, dès lors qu'elle sont devenues non plus certes des motivations réelles, mais bien plutôt des rationalisations *a posteriori*. Cela indique autant de distorsions révélatrices entre les conceptions et les pratiques. Nous ne donnerons ici qu'un exemple parmi d'autres : tel scientifique croit encore rechercher ce qu'il appelle des « lois de la nature » alors qu'en pratique, il contribue d'abord à l'émiettement de ce genre de représentations.

Pour le dire donc en un mot, même si notre objet d'étude reste assez formel (puisqu'il est d'abord conceptuel, scriptural, graphique ou symbolique avant de devenir logiciel), nous ne nous sommes pas cantonné à une pure histoire intellectuelle, mais plutôt à une histoire autant que possible *intégrative* où les évolutions technologiques et institutionnelles ont aussi toute leur place. Cela est d'autant plus vrai que cette histoire des formalisations interfère profondément avec celle des technologies informatiques, et en particulier avec celle des périphériques graphiques. Ces techniques nouvelles et coûteuses nécessitent en effet toujours plus de moyens et donc plus de soutien institutionnel.

Comme nous l'avons expliqué, l'accroissement du rôle des institutions et des réseaux d'acteurs au détriment des motivations purement spéculatives sera à prendre en compte au cours même de notre exposé des faits. Conformément à l'évolution de l'objet, cela en modifiera quelque peu la nature. Les deux premières grandes époques que nous avons discernées seront ainsi le théâtre de tentatives toutes personnelles et donc assez isolées. Dès lors, l'accent sera d'abord mis sur une approche de l'objet par des biographies intellectuelles et par l'analyse de filiations de loin en loin. Notre histoire s'apparentera là davantage à un récit d'épisodes marquants. Mais à partir du moment où la formalisation de la forme de la plante au moyen de l'ordinateur sera réellement applicable en champ, elle sera appelée à s'insérer dans un réseau d'intérêts bien plus serrés. Alors, pour cette troisième et dernière grande époque, il nous faudra considérer la mise en place d'un réseau d'acteurs comme d'un ensemble institutionnalisé de production de pratiques et de savoirs.

Or, c'est là que nous avons dû cibler davantage la catégorie des acteurs auxquels nous voulions nous référer. Si convergence il y a, pourrait-on nous objecter, il devait pourtant être possible de raconter cette histoire en partant de n'importe laquelle des différentes écoles de modélisation entre-temps constituées et réparties à travers le monde depuis les années 1980. Il aurait été peut-être même préférable de prendre du recul, d'en rapporter *de front* les différentes évolutions dans les grandes lignes, cela de manière plus impressionniste et donc moins axée sur les biographies d'acteurs, pour les voir ensuite converger l'une vers l'autre devant une problématique commune qu'elles auraient par exemple affrontée de manière contemporaine. Mais les choses ne se sont pas passées ainsi. Si cette problématique commune existe bien (rendre les modèles enfin applicables sur le terrain : passer de la théorie à la pratique), les différentes écoles de simulation et de modélisation ne l'ont pas affrontée aux mêmes époques. Et il s'avère bien, à ce sujet précis, que la convergence n'est pas parfaitement symétrique. Comme nous le supposions au vu des premiers sondages, les publications les plus récentes (2004) confirment plus que jamais le fait que la plupart des écoles de modélisation de la forme et de la croissance de la plante, quels que soient leurs objectifs (botaniques, environnementaux, agronomiques,…) convergent aujourd'hui vers des concepts et des techniques inaugurés par l'école française de simulation de l'architecture des plantes dès les années 1970. Même si nous nous sentions dès lors un peu gêné d'être dans l'obligation de raconter une « histoire à succès », et donc une histoire un peu trop tirée par le présent, cela nous confirmait en tout cas dans notre présomption que les choses les plus décisives s'étaient produites autour du laboratoire français du CIRAD. Mais, comme l'histoire même de ce laboratoire n'est pas dépourvue de déceptions voire d'échecs, et que, de surcroît, il s'est assez tôt lié de façon pragmatique et opportuniste à un grand nombre de collaborateurs de toute discipline, étudier plus spécifiquement les travaux de ce laboratoire ne devait pas nous condamner à nous enfermer ou à ignorer les autres approches. Cela a donc été notre choix pour cette dernière époque.

L'esprit de notre projet étant précisé, attachons-nous maintenant à la nature des sources que nous avons mobilisées et interrogées pour les faire servir à cette fin.

Les sources primaires

Quels ont été les critères de *contenu* pour la sélection des sources ? Au vu de la définition de l'objet et de l'approche que nous voulions adopter, notre choix ne s'est pas fait par hasard. Tout d'abord, dans les dépouillements de documents auxquels nous nous sommes livré, nous nous sommes astreint en priorité à sélectionner les travaux portant sur la modélisation ou la simulation de la forme des plantes, que ce soit la plante en ses parties ou en totalité. Ainsi, nous n'avons pas retenu les travaux de mathématisation qui se penchaient uniquement sur la physiologie ou sur le fonctionnement de la plante. La forme seule nous intéressait. Pourtant, nous n'avons pas cru bon de négliger certains travaux voisins quand il se révélait, à travers les bibliographies et les influences avérées, qu'ils avaient eux aussi joué un rôle. Dans cette perspective élargie, les travaux que nous avons choisis sont tous reliés entre eux, et, en dernière analyse, ils sont reliés à une problématique de modélisation de la forme. Ces liens entre travaux peuvent être de quatre types différents : ils sont liés soit parce qu'ils sont les produits des mêmes acteurs (hommes ou laboratoires), soit parce qu'ils entretiennent entre eux des liens d'influence, de filiation ou d'opposition, soit parce qu'ils concernent une même approche du même objet (la forme et la croissance des plantes), soit parce qu'ils utilisent la même technique de modélisation sur des objets différents mais analogues (formes ramifiées…). Notons que cette méthode souple ne nous

a pas cependant obligé à la pure association libre. Il ne s'agissait pas d'une méthode de recherche en rhizome qui se rendrait incapable d'offrir un, voire des fils directeurs : comme nous le supposions, « l'objet d'étude », en l'occurrence ici la forme de la plante, s'est bien révélé appartenir à une histoire de plus longue durée, malgré le fait que sa définition a pu varier sensiblement à l'échelle de quelques décennies, mais sans toutefois se modifier tout à fait, à la différence des laboratoires, des acteurs, des approches et des techniques. C'est la raison pour laquelle les sources que nous avons exhumées conformément au critère simple de l'objet d'étude « forme de la plante » ont pu, comme nous nous y attendions, conserver une unité de ton si ce n'est une unité d'inspiration.

Quels types de sources étaient alors disponibles ? D'abord des sources écrites. Les sources écrites les plus nombreuses et les plus accessibles étaient les articles publiés, les revues, les monographies, les thèses, les actes de colloque, mais aussi les sites Internet accrédités par des institutions académiques, ainsi que leurs publications en ligne. Ce matériau des publications a été de loin le plus précieux et celui qui a servi le plus systématiquement à nos objectifs. On nous objectera cependant plusieurs points.

Tout d'abord, en histoire des sciences, il faut distinguer le contexte de découverte du contexte de justification, en l'espèce ici le contexte de conception du formalisme de son contexte d'exposition. Il faudrait donc ne pas se fier tout uniment aux publications. Cette distinction nous paraît valable en effet. Et il serait toujours bon de recouper une information ou une interprétation avec d'autres sources, émanant d'une autre personne par exemple, ou même avec des sources d'une autre nature comme un entretien oral. C'est la raison pour laquelle, lorsque cela était possible, nous nous sommes astreint à l'une ou l'autre de ces contraintes (voir plus bas pour les sources orales). Mais lorsque cette possibilité ne se présentait pas (pour cause de décès de l'auteur par exemple), nous nous sommes aperçu que le fait d'être suffisamment pugnace pour disposer de la grande majorité (ou d'un spectre « suffisamment » représentatif) des publications d'un même auteur tout au long de sa vie offrait déjà maintes possibilités de rectifications internes. La manière dont ce dernier présente ses idées évolue en fonction de son âge, de ses positions institutionnelle, intellectuelle, académique et sociologique. À maintes reprises, ce sont les publications tardives (20 ou 30 ans plus tard) qui révèlent sur un mode parfois descriptif, parce qu'alors psychologiquement ou sociologiquement désinvesti, ce qui manque à l'historien pour l'intelligibilité d'une période antérieure. Il nous a donc été profitable de naviguer au cœur de quelques grandes œuvres (grandes par le volume au moins !) en faisant l'hypothèse que certains indices, même ténus, pouvaient nous révéler ce que nous cherchions. Et rares furent les situations où nous ne fûmes pas récompensé. Il s'agissait notamment de cas de mort prématurée ou de disparition du monde de la recherche et des publications. Deux auteurs seulement sur la trentaine de ceux qui nous ont plus particulièrement intéressé tombaient dans l'un ou l'autre de ces deux cas de figure (W . R. Stahl et D. L. Cohn). À lire certaines œuvres toutefois (celles de chercheurs plus isolés et à faibles interactions), on ne peut échapper au sentiment qu'y persiste une forme de voile qui biaise durablement la présentation des travaux et des réelles motivations. Dans ce cas-là, l'analyse de certaines des controverses auxquelles ces œuvres ont été mêlées devient très précieuse. Elle peut grandement aider l'historien à dévoiler plus crûment les motivations des uns et des autres.

Moyennant ces considérations de méthode, précisons maintenant ce que nous appelons une « lecture attentive ». Elle consiste en une lecture patiente et à l'affût de tous les indices qui peuvent servir à situer le lieu intellectuel d'où parle l'auteur : expressions, tournures de phrases, choix des représentations graphiques, choix du nom des variables mathématiques… Avec cet

indice du nom des variables par exemple, il nous est apparu qu'un certain auteur recopiait tout bonnement un passage tiré d'un texte de sa bibliographie, sans qu'il le précise explicitement dans l'article. L'attention aux remerciements accompagnant les publications est tout aussi capitale, même s'ils sont calculés et manquent souvent de sincérité et de fidélité eu égard à la situation concrète réelle de l'auteur. Mais ce sont surtout les bibliographies, bien entendu, qui sont des sources majeures d'informations. Une analyse et une remontée dans le temps au moyen d'une lecture assidue des textes cités en bibliographie est bien le minimum que l'on puisse faire, même si le caractère exponentiel de cet exercice d'intertextualité oblige à se fixer des limites raisonnables de temps et d'extension. Pour notre part, nous devions nous limiter de façon sensée. Outre le fait que l'on finit tout de même par retomber souvent (mais pas toujours) sur les mêmes références initiales, de manière à focaliser notre attention plus efficacement dans le cadre circonscrit par notre problématique, nous nous sommes arrêté, pour cette remontée dans le temps, aux périodes qui correspondaient au début de la modélisation mathématique dans les sciences du vivant, c'est-à-dire aux trois décennies qui précèdent justement l'émergence de l'ordinateur. Par ailleurs et enfin, une réflexion sur l'évolution de ces bibliographies chez un même auteur, dans ses différents articles, peut être très instructive. L'ensemble de ces différents types d'analyse du document scientifique constitue donc ce que nous appelons une lecture attentive.

Nous avons eu l'occasion de tester empiriquement la valeur de cette méthode d'analyse interne puisque, au début de notre recherche, nous avons d'abord volontairement retardé les rencontres avec les acteurs vivants de manière à ne pas être directement influencé par eux dans notre approche historique interprétative. Et c'est ensuite, lors de ces rencontres, qu'il nous a été donné de vérifier après coup et à plusieurs reprises le bien-fondé de ce que nous supposions à partir des seules analyses de texte scrupuleuses. À d'autres reprises cependant, certaines supputations ne se sont pas vérifiées : notamment lorsque d'autres documents étaient découverts et mettaient à mal l'hypothèse d'une filiation intellectuelle par exemple. Quand certains points factuels ou d'interprétation apparaissaient décisifs et pouvaient changer considérablement la perspective que nous devions avoir sur le passé, nous nous sommes donc astreint à ne conserver que ce qui avait été recoupé au moins une fois, par d'autres sources.

Enfin, à côté de ces rapprochements internes occasionnés par le contenu des bibliographies, nous avons procédé à plusieurs dépouillements systématiques de revues dont *Ecological Modeling*, la *Revue Forestière Française*, la revue *Natures, Sciences, Sociétés*, la revue *Simulation* (devenue *Modeling & Simulation* en 2002), le *Journal of Theoretical Biology* et enfin la revue *Café, Cacao, Thé*. Ces dépouillements permirent d'effectuer des rapprochements externes dans les différents secteurs à quoi touchait, pendant notre période, le traitement de notre objet d'étude. Deux séries de symposium, avec leurs actes, ont été aussi plus systématiquement dépouillées : *Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, d'une part, et *Artificial Life*, d'autre part. Ces dépouillements ont permis de mettre en lumière la diversité des écoles de modélisation et les oppositions, voire les rivalités qui sont présentes de manière souvent sous-jacentes.

Le second point que l'on peut nous objecter par rapport à l'usage privilégié des publications consiste à faire remarquer que, dans l'écriture de la science la plus contemporaine, les redites sont la règle et peu d'informations nouvelles peuvent être tirées d'une accumulation systématique des publications. Les publications auraient une fonction de médiatisation et d'« écrantage » plus que de révélation du vrai travail de recherche. Il faudrait alors se déplacer, voir en anthropologue comment cela se passe dans les laboratoires, juger sur pièces en quelque sorte. Puisque les chercheurs sont évalués et estimés au nombre de publications, ces redites sont en effet très

fréquentes. Et nous avons, nous aussi, constaté cette tendance. Mais, pour notre objet d'étude, elle est à relativiser considérablement car elle vaut uniquement à partir du moment où la modélisation de la forme et de la croissance des plantes est devenue une pratique plus répandue, plus réticulaire, plus normalisée et organisée systématiquement dans des laboratoires dont cela devenait la vocation affichée, c'est-à-dire à partir du début voire du milieu des années 1990. Jusqu'à cette date le principe d'accumulation et de comparaison des publications est irremplaçable. Il se trouve de plus que le laboratoire qui nous intéresse en priorité à partir de cette époque a publié avec parcimonie à ses débuts, cela pour des raisons institutionnelles que nous préciserons en temps utile.

Plus radicalement, on peut aussi répondre que le postulat implicite de cette objection est faux et qu'à recourir à une lecture attentive, on a toujours quelque chose de significatif à glaner à proportion même de la *faiblesse* des différences de contenu entre les textes publiés : souvent, plus elles sont faibles, plus elles sont justement l'indice d'une volonté précise et calculée de signifier ceci plutôt que cela, surtout chez un auteur qui publie pour la nième fois son travail, dans des revues différentes. Publier la même chose dans des revues d'orientations différentes revient selon nous à une sorte d'analyse spectrale du même travail : cela en donne un rendu plus « volumique » et plus humain aussi. L'historien devrait au contraire se sentir comblé par cette auto-reprise et cette pléthore du document conscient contemporain : c'est une possibilité d'analyse objective nouvelle qui lui est offerte et qu'il ne doit surtout pas dédaigner. Selon nous, on aurait donc grand tort de la négliger sous prétexte que cela devient lassant et que l'on voit bien ce que l'auteur veut dire. Certes on voit ce qu'il « veut » dire mais lit-on ce qu'il nous *dit* réellement ? Lit-on ce que le document dit ?

Conservons donc ce principe critique jusqu'au bout : il n'y a aucune proportionnalité simple entre ce que l'auteur *veut* faire apparaître comme important, l'importance du volume de ce qu'il *publie* pour le dire et l'importance réelle de ce qu'il nous *dit* pour notre problématique. Là encore, la problématique et l'intrigue historique que nous voulons découvrir font foi pour la méthode. Ne nous laissons pas abuser par l'apparente monotonie et uniformité du flot des significations. En nous efforçant de lire et de recueillir les à-côtés de ces écrits pléthoriques, nous avons trouvé des trésors de significations. Cette méthode de lecture attentive a un inconvénient bien sûr : elle ne permet pas d'embrasser du regard rapidement tout un secteur de la science contemporaine. Il faut donc resserrer ses exigences et avancer à pas comptés. Ce que nous avons fait. Mais là encore, notre choix d'un objet d'étude précis et suffisamment limité nous a aidé. Notre conviction est donc que les publications restent un moyen privilégié de production, de communication et de persuasion.

Parmi les sources écrites, et malgré la difficulté de se les procurer dès lors que l'historien n'a pas la liberté de dépouiller des documents administratifs très récents aussi facilement que des documents archivés depuis plusieurs siècles, nous avons tout de même eu accès à quelques documents internes précieux. À côté des rapports d'activité qui sont d'accès public, ce sont le plus souvent des rapports d'évaluation, comme le « Rapport préparatoire à la revue externe » et le « Rapport de la revue externe » du laboratoire du CIRAD, qui nous ont été accessibles. Même s'ils sont l'un et l'autre orientés par des objectifs qu'il nous faut savoir déceler, ces deux types de rapport offrent l'intérêt de mettre en scène un dialogue entre un regard extérieur sans grande concession et une auto-évaluation d'un laboratoire après plusieurs années de fonctionnement.

Les sources orales

Il faut bien reconnaître que lorsque l'histoire s'accélère et qu'un domaine de recherche s'institutionnalise et se structure, comme c'est le cas ici, les seuls documents écrits sont loin de nous fournir toutes les clés de l'évolution du domaine. De plus, dans les cinq dernières décennies, le développement considérable des moyens de communication téléphoniques puis télématiques dans les milieux de la recherche, comme ailleurs dans la société, s'est accompagné d'une considérable altération de toute trace de ces liens plus ou moins informels qui se nouent quotidiennement entre chercheurs et qui pouvaient auparavant nous être conservés sous la forme de correspondances écrites. Nous avons donc eu recours à des sources orales que nous avons nous-même contribué à produire. C'est même un autre intérêt du choix de notre objet d'étude : le domaine ne s'est cristallisé, c'est-à-dire complexifié et accéléré, qu'à partir des années 1970. La plupart de ces acteurs sont donc encore en vie. Et ils peuvent nous aider à pallier le manque des sources écrites face à cette accélération de l'histoire et aux nouveaux moyens de communication. Nous avons donc procédé à une série de 10 entretiens assez largement non-directifs avec quelques uns des acteurs les plus engagés dans cette histoire. Parmi les sources orales, nous avons aussi utilisé quelques uns des entretiens menés avec des chercheurs de l'INRA tels qu'ils ont été publiés et mis en ligne par Jean-François Picard sur un site Internet du CNRS (Ivry/Villejuif).

Enfin, quand cela nous paraissait nécessaire et quand cela nous était possible, nous avons contacté directement par téléphone ou par courrier électronique certains des acteurs plus indirects ou plus éloignés. Nous leur avons à chaque fois demandé de témoigner de leur propre perception de certains faits ou de certains points d'histoire qui nous paraissaient obscurs. La plupart de ces acteurs ont bien voulu que l'on cite également l'existence de ces communications personnelles au cours de notre récit.

Les objets techniques

En ce qui concerne les « objets » techniques que rencontre notre histoire, il faut noter qu'ils sont très inégalement accessibles. Les ordinateurs, par exemple, dès lors qu'ils deviennent rapidement dépassés, ne sont pas conservés dans les lieux du laboratoire. Pour des raisons de compatibilité, d'encombrement et de vétusté, il n'y a le plus souvent aucune facilité pour l'historien des techniques de pouvoir voir fonctionner de nouveau des systèmes informatiques anciens avec leurs logiciels. De plus, à partir des années 1960, à cause de leur longueur notamment, les listes des programmes ne sont plus publiées dans leur intégralité. Leurs supports magnétiques sont égarés ou illisibles car effacés ou incompatibles avec les technologies nouvelles : ces listes sont perdues le plus souvent à jamais. C'est autant d'occasions en moins d'analyser des styles de programmation ou d'implémentation de modèle pour l'historien des sciences.

Cependant, avec le progrès en puissance des ordinateurs personnels, certains des derniers programmes de simulation de plantes peuvent être testés directement et on peut les voir fonctionner chez soi, notamment grâce à l'existence de versions de démonstration allégées et téléchargeables sur Internet.

En réalité, de par notre objet d'étude, la plupart des publications valent assez vite comme autant de possibilités de jeter un regard direct sur les productions de l'objet technique. En effet, comme c'est le traitement de la forme qui nous intéresse, à partir des années 1960, l'ordinateur en plus d'une machine à modéliser devient, dans ce domaine, une machine à dessiner. Or, ces

graphes, ces dessins, ces copies d'écrans sont quant à eux toujours publiés et donc aisément accessibles. Si le système informatique qui les a engendrés nous demeure parfois mal connu (même si de bons musées virtuels de l'informatique se développent sur Internet), il n'en est donc pas de même pour leurs productions qu'il nous est plus aisé d'apprécier et de comparer.

Les sources secondaires

À notre connaissance, il n'y a pas de travaux suivis d'historien, de philosophe ou de sociologue sur l'histoire spécifique du traitement de la forme des plantes depuis l'émergence de l'ordinateur. Comme cela est de coutume dans les sciences contemporaines, les travaux sur cette histoire sont surtout le fait de scientifiques engagés dans ces recherches. Or, ces histoires de scientifiques servent souvent à mettre en ordre des références pour qu'une orientation en ressorte renforcée. Il nous faut donc les utiliser avec prudence même s'ils sont parfois les sources les mieux informées et les plus exhaustives.

Le cas de ce genre de publication nous plonge de surcroît au cœur d'un problème que nous avons constamment rencontré lors de nos recherches : lorsque l'on fait de l'histoire des idées contemporaines, y a-t-il toujours une frontière bien nette entre sources primaires et sources secondaires ? Car, d'un certain côté, ces « histoires de scientifiques » sont sources de renseignements seconds. Elles nous suggèrent des pistes de compréhension pour notre propre intrigue historique, au même titre que les travaux antérieurs d'un collègue historien. D'un autre côté, elles sont aussi les symptômes d'une vision partielle, engagée. Elles incarnent souvent une école de modélisation. Elles font donc aussi partie des sources primaires en ce sens.

Face à ce problème majeur, et puisque nous avons dû aller à l'école de ces scientifiques engagés avant de tenter d'avoir du recul sur leur production, le mieux que nous ayons trouvé est de lui opposer un travail d'interprétations constamment révisables au moyen d'hypothèses et de rectifications internes successives. Nous abstenant de juger par nous-même, nous avons d'abord compté sur les outils de critique interne que nous donnaient leurs collègues scientifiques. Faute de quoi cet *imbroglio* pouvait devenir préjudiciable à l'objectivité de l'enquête historique elle-même. Avons-nous été à l'abri de choix partisans pour autant ? Ce n'est pas à nous de le certifier. Sur ce point, nous nous fondons avec confiance sur l'idée de Raymond Aron selon laquelle l'histoire d'aujourd'hui devra être révisée demain, même si, autant que faire se peut, on doit tenter de s'arracher dès aujourd'hui aux déterminations de notre époque, en tout cas, à celles qui sont les plus inconscientes et les moins assumées.

La situation se complique encore et le problème resurgit avec force lorsque, élargissant notre zone d'intérêt pour les sources secondaires, nous nous penchons sur les œuvres des philosophes, cette fois-ci pléthoriques, qui portent sur la modélisation : ces œuvres sont lues et utilisées pratiquement immédiatement par les modélisateurs eux-mêmes ! Il y a donc un télescopage, certes bien naturel et commun dans les sciences humaines (cercle épistémologique) mais qui, dans l'histoire des sciences et des idées contemporaines atteint des proportions inhabituelles surtout lorsque notre époque et notre objet de prédilection présentent, comme c'est le cas ici, un certain nombre d'acteurs motivés au départ par des préférences épistémologiques ou ontologiques. Il faut donc en prendre notre parti : l'histoire des formalismes et des modélisations, comme l'histoire des mathématiques, est longtemps restée étroitement liée à l'histoire de la philosophie, de l'épistémologie et des théories de la connaissance. Tel, philosophe ou scientifique, condamne ainsi la modélisation pour des raisons idéologiques ou politiques. Tel autre, philosophe

ou scientifique encore, prône la modélisation mathématique mais refuse ou marginalise en revanche la simulation informatique pour des raisons philosophiques ou ontologiques.

Comment avons-nous tenté de sortir de ce problème majeur qui se pose plus généralement à l'épistémologie de l'histoire des idées et des sciences contemporaines ? Nous avons opté pour une sorte de bon sens, certes un peu trop pragmatique peut-être, mais qui doit, selon nous, demeurer attaché à la perspective de l'historien des sciences comme aussi, et surtout, à celle de l'historien des techniques, et donc en particulier à celle de l'historien des logiciels, en nous proposant ce critère : qu'est-ce qui fonctionne finalement ? Qu'est-ce qui quitte le monde du discours, des écrits et des dessins pour entrer dans l'interaction contrôlée avec la nature ? À partir du moment où l'on peut raisonnablement, et là est le bon sens, dire que quelque chose fonctionne en ce sens précis, il nous faut partir de là et non du discours qui parle de ce qui est censé fonctionner ou valoir au nom de tel ou tel principe. C'est un fait que les modélisations sont devenues calibrables en devenant des simulations. C'est un fait qu'il y a des problématiques d'arboriculture qui ont alors été résolues par l'intervention de ces nouvelles modélisations dès les années 1970, mais pas avant. C'est un fait qu'il y a aujourd'hui une convergence à la fois conceptuelle et pragmatique des modélisations sur le terrain, toujours grâce à ces calibrations. C'est un fait enfin que naît sous nos yeux, à l'échelle institutionnelle, une compétence nouvelle dite de « bioinformatique et de modélisation des plantes ». Tel est en effet le nom d'une Unité Mixte de Recherche créée autour des travaux du CIRAD en 2001.

Ce sont ces faits de l'histoire des sciences qui doivent servir à juger la philosophie des sciences et non l'inverse, tant il est vrai que, comme nous le croyons, l'histoire de la philosophie des sciences comme aussi l'histoire de l'histoire des sciences sont des « *histoires jugées* », au sens de Bachelard. Par un effet de transitivité à sens unique, finalement assez compréhensible, ce sont des histoires jugées par les savoirs, les compétences et les pratiques des sciences les plus contemporaines. C'est même une des raisons pour lesquelles nous avons pris le risque de n'interrompre notre histoire qu'à l'année 2003.

Ces philosophies des formalisations ou des modèles ont donc souvent été traitées par nous non comme des sources secondaires ni comme des manuels de méthodologie ou d'épistémologie de l'histoire des sciences valables pour l'historien des modèles et des formalisations, mais plutôt comme des sources primaires. Aux côtés des pratiques de modélisation, elles nous ont servi d'indicateurs des idées du temps, de ces idées qui ont habité et influencé, selon leur propre aveu même, beaucoup de nos acteurs scientifiques. Ce n'est pas faire injure à la philosophie des sciences, loin de là, que de lui dire qu'elle a un rôle de poids dans l'histoire des formalisations. Mais elle est du côté de l'objet d'étude et non du côté de la méthode historique. Car elle constitue une partie intégrante de l'objet qu'étudie cette histoire. La contrepartie de cela est qu'elle doit accepter d'être jugée et rectifiée en retour par la science en marche (voir notre annexe B).

Il en est autrement des travaux qui se présentent comme autant d'histoires de la modélisation dans les sciences de la vie ou de la simulation dans les sciences exactes. Pour l'essentiel, nous les avons pris comme point de départ. Ils nous ont servi à contextualiser notre propre histoire (voir notre annexe A). Ils nous ont aidé à comprendre que l'histoire de la formalisation des plantes côtoie plus qu'elle ne participe réellement de l'intérieur à l'histoire de la modélisation mathématique au 20ème siècle. En fait, les problèmes de représentation formelle de la morphogenèse des plantes contribuent à révéler constamment certaines insuffisances de la modélisation mathématique dans les sciences non-exactes sous les trois formes successives qu'elle a prise : statistiques, cybernétiques, théoriques. En même temps, ils révèlent la nature de ces différentes modélisations. Et ce sont eux qui président à la naissance de l'alternative qu'est la

simulation numérique puis informatique dans ses applications aux sciences des objets complexes que sont les sciences de la vie.

Plan analytique

Après l'exposé du choix de l'objet, du type d'approche et des matériaux mobilisés, nous pouvons désormais fournir le plan annonciateur des parties qui vont suivre. Dans ce plan, le lecteur verra que nous avons cru pouvoir déceler trois grandes époques dans cette histoire. La première précède l'émergence de l'ordinateur, la deuxième décrit les premières réactions face à l'ordinateur, la dernière décrit l'évolution qui s'est accélérée depuis la mise à disposition d'ordinateurs plus puissants et surtout disposant de systèmes d'interface graphique performants. Trois mots-clés successifs indiquent ce qui fait la relative cohésion de chacune d'elle, comme aussi son articulation avec les autres : le déracinement, la dispersion, la convergence.

Dans ce travail, avant d'entrer de plain-pied dans la période qui nous intéresse, nous nous devions auparavant de restituer rapidement les quelques commencements de mathématisation de la forme des plantes tels que les siècles précédents nous les avaient légués. Sans prétendre étendre inconsidérément notre enquête dans le passé et dépasser ainsi les limites que nous nous étions fixées, nous nous devions de restituer la signification que leurs auteurs leur conféraient de manière assez générale. Car c'est par rapport à cette interprétation antérieure du statut des mathématiques dans la forme des plantes que le début du 20ème siècle s'inscrit en nette rupture. Avec le premier lieu de naissance de la méthode des modèles mathématiques dans les sciences de la vie, en l'occurrence avec le développement des modèles statistiques, on nie en effet tout enracinement du formalisme dans le réel. Les mathématiques peuvent dire le réel vivant dans ses formes, mais à condition qu'elles deviennent descriptives. Les caractères morphologiques sont formalisés, mais c'est à une morphologie descriptive que l'on doit se cantonner. De même, avec la difficulté, puis avec le renoncement momentané, à dire la « loi de croissance absolue » et avec la solution alternative qui consiste à rechercher l'expression formelle d'une « croissance relative » ou « allométrie », cette idée de déracinement se confirme. La méthode des modèles se prépare donc également par cette voie-là, quoique plus indirectement. Pour cette époque, nous entrions sur un terrain où l'histoire générale de la modélisation mathématique dans les sciences de la vie et de l'environnement intervient au premier chef. Mais les travaux d'histoire à ce sujet en sont encore à leurs débuts et restent, en grande partie, à écrire (voir notre état des lieux, dans l'annexe A, toutefois). Pour tâcher de rendre compte, malgré tout, et dans ses grandes lignes, de la naissance de la méthode de modèles, comme cela était un objet trop vaste pour nous, nous avons choisi de nous pencher sur les approches de quelques personnages emblématiques déjà reconnus, comme Ronald. A. Fisher ou Georges Teissier, sans prétendre entrer dans le détail de l'histoire des concepts, et en ayant conscience des limites de cette perspective. En tout cas, nous l'avons fait en privilégiant toujours l'angle de vue que nous conférait notre problématique, c'est-à-dire en focalisant notre attention sur la forme et le sens que ces personnages influents donnaient à la formalisation, en particulier à la formalisation des plantes à laquelle il se trouve qu'ils ont fortement contribué.

Mais donc, faire place à des formalisations du hasard ou à des fictions commodes (et non plus directement explicatives), comme le firent ces premiers tenants des modèles, avait de quoi rebuter ceux qui tenaient à la méthode ancienne héritée de la mécanique analytique. Ces premiers déracinements, même s'ils se généralisèrent et triomphèrent en fait sur le terrain, en particulier

avec les développements de la biométrie et des plans d'expérience de l'agronomie, furent l'objet de vives réactions et résistances, surtout dans les pays anglo-saxons. La méthode des modèles statistiques ou allométriques permettait en effet de décrire, dans les morphologies des plantes, ce qui était mesurable, ce qui pouvait être rapporté à une métrique, mais pas ce qui semblait ressortir d'un mécanisme de mise en place de formes qualitativement différentes, hétérogènes donc, et procédant pourtant visiblement les unes des autres au cours de la croissance. Des résistances de type physicaliste et réductionniste vont donc voir le jour pour tâcher de résoudre ce problème de morphogenèse.

Plus significatif encore et inédit pour l'époque, face à l'insuffisance des styles de formalisation proposés par cette première forme de résistance, commence à se développer un autre type de résistance que nous qualifions de mathématiste. Selon elle, si ce n'est plus par le bas, par la physique, que l'on peut expliquer à la place de décrire, ce sera peut-être par le haut, c'est-à-dire par les idées mathématiques *a priori*… D'où des tentatives curieuses comme une axiomatisation directe, c'est-à-dire sans substrat pour référence, des règles supposées de la morphogenèse. Mais on aurait tort de voir là un acquiescement qui anticipe simplement la généralisation de la méthode des modèles et sa manière de mathématiser directement : il s'agit plutôt d'une des dernières tentatives de demeurer dans la perspective de cette idée selon laquelle les mathématiques théorisent et parlent de l'essentiel.

Tel est donc le tableau que l'on peut dresser peu avant l'émergence du calculateur numérique. Or, cette émergence est contemporaine et en quelque manière détermine la deuxième naissance de la méthode des modèles dans les sciences de la vie. C'est en fait sa véritable époque de naissance au sens strict. L'expression « méthode des modèles » n'est d'ailleurs proposée qu'autour de 1952. C'est à partir de ce moment-là qu'elle se diffuse dans pratiquement tous les domaines des sciences de la vie et de l'environnement. Appuyé par l'analogie de l'automate (l'ordinateur comme modèle) comme par la diversité inédite de ses usages (l'ordinateur comme calculateur de modèle), la méthode des modèles s'étend considérablement et devient la pratique la plus répandue dans les formalisations d'après-guerre, tant en dynamique puis en génétique des populations, qu'en écologie, physiologie ou agronomie… Dans le cadre de la cybernétique et de la recherche de ces systèmes auto-régulés qui ont la particularité d'être isomorphes les uns aux autres d'un point de vue mathématique (systèmes artificiels ou naturels), la « méthode des modèles » est en effet reconnue dans sa généralité comme dans la gratuité et donc dans la possible dispersion de ses motivations. Ce terme de *dispersion* nous semble donc bien caractériser l'époque qui commence ici. Ainsi, même s'il est parfois l'objet d'un culte ou d'une récupération ontologisante témoignant d'un retour du refoulé (le deuil du déracinement), dans les travaux les plus sérieusement applicables, le recours au concept d'information permet en fait de déraciner un peu plus largement encore les formalismes, de les extraire du réel qu'ils expriment. Il se rendent ainsi davantage mobiles et mutuellement interchangeables.

Mais en ce qui concerne la forme des plantes, ce que va apporter l'ordinateur dans les premières années de sa mise en place n'a pas directement de rapport avec cette vague cybernétique. L'ordinateur apporte plutôt de nouvelles possibilités de prendre en compte ce caractère qualitatif, c'est-à-dire résistant à toute condensation symbolique et formelle, de la morphogenèse et de le faire répliquer ensuite par la machine au moyen de simulations dites numériques. Il est d'ailleurs remarquable que ce soient quelques uns des pionniers de l'informatique moderne qui aient proposé les premiers usages de l'ordinateur pour la formalisation et le traitement de la morphogenèse. Pourtant, ce premier tableau des simulations n'est pas non plus uniforme. À y regarder de près, comme dans les modélisations mathématiques alors en plein

essor dans les disciplines connexes, les simulations numériques de la morphogenèse naissent en ordre dispersé. Quand un auteur valorise encore le formalisme différentiel dans l'esprit de l'embryologie organiciste des années 1930, l'autre voit plutôt la proximité entre des questions de calcul en physique et la possibilité que donne l'ordinateur de construire de manière discontinue des formes ramifiées au moyen de cellules élémentaires et de règles locales et réitérées. Un dernier enfin fait assumer à l'ordinateur la gestion du hasard des rencontres des cellules en un scénario qui pourrait hypothétiquement ou fictivement présider aux mécanismes de la morphogenèse. D'entrée donc la dispersion est de rigueur là aussi. Cette dispersion des simulations spéculatives ne sera pas levée de sitôt par une confrontation avec l'expérience : ces modèles de simulation inchoatifs sont bien trop grossiers pour prêter à une quelconque calibration sur des plantes réelles. Et leurs promoteurs ne sont pas biologistes de formation mais mathématiciens.

À l'époque, en ce qui concerne le traitement formel de la plante, les biologistes mathématiciens et les biophycisiens de formation se retrouvent en fait plutôt du côté de ceux qui résistent. Mais c'est précisément à la dispersion des méthodes de formalisation qu'ils résistent cette fois-ci. En un sens, ils ont accepté entre-temps le déracinement qu'on voulait leur imposer dans l'époque antérieure. Mais ils l'acceptèrent comme Einstein l'accepta peu avant : sans renoncer pour autant à l'idée mathématiste de rechercher une loi unique et monoformalisée de la morphogenèse. Nos formalisations sont des modèles (là sera d'ailleurs le troisième lieu de naissance de la méthode des modèles en biologie), et nos modèles sont des fictions, pensent-ils. Mais, ajoutent-ils, il y a une fiction meilleure que les autres. Il faut donc la chercher car c'est la théorie vraie. Ils interprètent désormais le fait du déracinement comme un blanc-seing pour un saut vers le haut, vers l'abstraction et les formalismes les moins intuitifs. Il est à ce sujet tout à fait instructif de constater que ce sont les mêmes auteurs qui, d'une époque à l'autre, passent d'une volonté d'enracinement à une volonté d'abstraire. Dépendre du ciel ou s'enraciner dans la terre, c'est au fond toujours se fixer. C'est surtout éviter l'errance et la dispersion anarchique. Ainsi, de la terre des atomes au ciel des idées, le chemin n'est pas si long pour cette biologie théorique d'après-guerre.

D'autre part, dans ces mêmes années 1960, un renouvellement récent de la physique par des questions de thermodynamique (bien que certaines de ses branches remontent au 19ème siècle), notamment avec la reprise de la notion d'entropie en rapport avec la notion d'information, ouvre un autre front dans le combat contre la dispersion des modèles et des simulations. Cette dispersion s'impose toujours plus en effet et irritent les chercheurs en quête d'unité. Elle est augmentée pratiquement, et en quelque sorte légitimée conceptuellement, par l'existence même des ordinateurs et des simulations. Ce nouveau front de résistance se compose de différentes recherches qui portent sur les mécanismes supposés conjoints, à l'échelle physique, des ramifications fluviales et végétales, puis sur des questions de phyllotaxie théorique appelée encore phytomathématique. Dans ces approches, c'est donc un physicalisme modernisé, rendu plus subtil et « informé » que le précédent, qui combat la dispersion en recherchant une théorie ou un modèle mathématique optimal pour la morphogenèse des plantes. Mais là encore, aucune calibration ne vient réellement sanctionner ce travail qui reste théorique pour l'essentiel.

En fait, la dispersion se confirme tant sur le plan des conceptions que sur le terrain. Comme il y a une dispersion de fait dans les modèles spéculatifs à visée unifiante, et ce malgré le fait que leurs sectateurs combattent justement cette dispersion, il y a aussi une dispersion au niveau des modèles pragmatiques sur le terrain. Dans ce contexte pourtant, la dispersion est mieux acceptée. Elle est même revendiquée, car elle sert aussi des arguments philosophiques

voire politiques dont nous devrons saisir la teneur et la portée. Après la guerre, les méthodes statistiques anglo-saxonnes se répandent en effet presque partout et notamment dans l'agronomie française. Cette importation massive, et tardive, de méthodes statistiques intervient au moment même où la biologie théorique fait encore entendre sa voix aux Etats-Unis. Lors de la reconstruction, la France qui modélise va s'abreuver aux deux sources. C'est notamment à cette filiation retardée et à une jonction entre ces deux pratiques d'âges différents que l'on doit l'originalité de l'école de modélisation française. Nous focalisant plus particulièrement sur quelques uns des travaux de cette école en modélisation de la morphogenèse, puisqu'ils vont par la suite former un des contextes de développement de la simulation de la forme des plantes en France, nous aurons l'occasion de voir qu'elle ne réussira pourtant pas vraiment à prendre en compte formellement ce phénomène de manière à ce que le modèle soit calibrable.

En fait, pour avoir les premiers modèles de morphogenèse calibrés sur des arbres réels, il faut attendre le début des années 1970. Surtout, de manière assez remarquable, car réitérée par trois fois dans des lieux différents, la possibilité de cette calibration ne pourra naître qu'au moyen, non de modèles mathématiques, mais de modèles de simulation sur ordinateur. Et cela ne sera possible qu'après une certaine évolution des ordinateurs, des langages et des périphériques graphiques. C'est donc à partir de ce moment-là que nous entrons dans une troisième époque : l'époque des convergences.

Il s'agit bien sûr d'abord d'une convergence des modèles de simulation avec l'expérience. Et là, l'avance de la recherche française peut être expliquée par son choix de recourir à une approche fondée sur une connaissance botanique bien précise née en son sein à la fin des années 1960 : celle des modèles d'architecture. La possibilité de procéder de manière permanente à des recherches en forêts tropicales, elle-même liée à son passé colonial, plaçait de toute façon la France en position favorable pour qu'émerge chez elle une telle approche. Mais il a fallu une problématique agronomique bien particulière pour que l'idée vienne de passer outre les limitations alors reconnues des modèles statistiques et de se servir de la simulation de l'architecture. C'est principalement là l'œuvre d'un homme, isolé au départ dans sa station agronomique de Côte-d'Ivoire. Nous en retracerons donc plus particulièrement la biographie intellectuelle jusqu'au point de voir ses travaux submergés par ceux de ses élèves et de ses collaborateurs de tous horizons. On verra ces productions scientifiques s'agréger puis graviter dans un réseau désormais étendu et ramifié tel qui s'est constitué à partir des premiers modèles conçus en Côte-d'Ivoire.

Dans les logiciels de cet ingénieur agronome, la convergence avec l'empirie se double en effet dès le départ d'une convergence entre modèles mathématiques à l'intérieur des dispositifs et des programmes de simulations qu'il nous faut désormais appeler pour cela simulations informatiques plutôt que simulations numériques. Non sans que quelques vicissitudes ne viennent l'atteindre, cette convergence entre modèles, entre épistémologies donc, va elle-même occasionner trois types de convergence particulière entre disciplines bien éloignées auparavant et sur le sens desquels nous reviendrons.

Cette troisième époque sera donc bien celle de la cristallisation de différents secteurs en une sorte de discipline transverse ou de compétence transdisciplinaire. Elle aura été occasionnée par une nouvelle méthodologie de modélisation, elle-même en grande partie permise par l'émergence de l'ordinateur. C'est cette structuration inédite de la recherche et de la production de solution technique que nous avons particulièrement voulu mettre en lumière et comprendre en focalisant notre attention sur la naissance et le développement du laboratoire AMAP du CIRAD, au cours de cette dernière époque (1971-2003). Nous avons étudié ce cas par contraste avec ce qui se fait ordinairement en modélisation de la forme : sur la fin, nous avons donc plus

particulièrement raconté l'histoire d'une solution qui finit par fonctionner, qui abandonne les spéculations et devient de la science en ce sens. Même si cela pouvait sembler nécessaire à l'exposé de notre troisième époque, nous avons donc choisi de ne pas poursuivre la description détaillée et conjointe des modélisations physicalistes alors qu'elles ne manquèrent pas non plus de se développer entre-temps. Car leur essor ne s'est fait qu'à la faveur des évolutions de l'électrochimie ou des connaissances sur les quasi-cristaux, par exemple, c'est-à-dire à l'occasion de propositions d'analogies nouvelles mais faites sur un mode ancien. Ces modélisations procédèrent de l'intérieur de la physicochimie et de son évolution propre, comme ce fut le cas pour les spéculations sur l'entropie dans les années 1950 et 1960. Autrement dit, elles sont restées spéculatives et analogiques. Surtout, elles ne concernèrent jamais la forme de la plante en totalité, au contraire des modèles de simulation architecturale. À notre connaissance, comme les modèles théoriques de naguère, aucune n'a été calibrée sur une architecture de plante réelle en totalité, et aucune ne permet donc encore une prise instrumentalisante sur la nature. Du point de vue méthodologique et épistémologique, elles n'apportèrent donc rien de nouveau par rapport au tableau que l'on pouvait dresser des différentes propositions en présence à l'époque antérieure.

Au terme de cette introduction, nous voudrions signaler que c'est à dessein que nous nous sommes passé de recourir trop systématiquement aux oppositions convenues entre théorie et expérience et surtout à celle qui a trop souvent cours entre modèle descriptif et modèle explicatif, et par laquelle on pense avoir tout dit. En projetant ainsi des *a priori* massifs sur des distinctions qui, à l'analyse, se révèlent souvent plus fines, nous nous serions condamné à ne pas voir certains des moteurs imprévisibles d'une histoire complexe, d'autant plus qu'un des résultats de ces travaux de simulation récents, dont nous tâchons justement de comprendre ici l'émergence et le sens, est la remise en question du caractère évident de la distinction entre expliquer et décrire, ou entre expliquer et prédire, si l'on préfère.

Remerciements

Avant tout, je remercie tout particulièrement ma femme et mon fils qui ont su résister à mes horaires et à mon rythme de travail. Je remercie également mes parents et ma famille qui m'ont soutenu et aidé pendant de longues années.

Je tiens à remercier vivement mon directeur, le Professeur Girolamo Ramunni, qui m'a patiemment écouté et assisté lors des travaux de recherche qui ont rendu possible ce travail de thèse. J'ai particulièrement apprécié son érudition mais aussi les discussions, parfois animées, que nous avons eues sur des points précis d'histoire ou d'épistémologie. J'espère que ce travail n'est pas trop indigne de la patience qu'il a longtemps montrée avant que, devenu philosophe comme je le souhaitais, je ne cède de nouveau à l'attrait de l'histoire des sciences et des idées.

Je remercie aussi les collègues qui m'ont soutenu pendant ces quatre années : Frédéric Amblard, Denise Avenas, Gilles Campagnolo, Robert Damien, Mai Lequan, Pierre Matarasso, Juliette Rouchier, mais aussi tous les collègues du Lycée Militaire de Saint-Cyr qui se sont intéressés à mon travail et qui, souvent, m'ont aidé à clarifier mes idées.

Toute ma reconnaissance va également aux acteurs et personnalités que j'ai pu rencontrer et interviewer pour constituer des archives orales : Hervé Bichat, Alain Coléno, Francis Collot, Jean Françon, Pierre Frankhauser, Francis Hallé, François Houllier, Jean-Marie Legay, Denise Pumain et Philippe de Reffye. Je remercie aussi les employés de la bibliothèque centrale du Museum National d'Histoire Naturelle, de la bibliothèque centrale de l'INRA, à Versailles, comme ceux de la bibliothèque de biologie de Jussieu, pour leur dextérité et leur efficacité. Un grand merci notamment à la documentaliste scientifique du laboratoire AMAP du CIRAD, Marie-Hélène Lafond, qui m'a grandement aidé à compléter mon fonds d'archives. Merci également à la secrétaire administrative générale de l'AMAP, Odile Chouillou, qui m'a accueilli à Montpellier et a facilité mes rencontres avec les chercheurs.

Je dois de chaleureux remerciements également à tous les acteurs ou historiens plus éloignés que j'ai pu contacter, qui m'ont souvent fourni d'autres documents, et qui ont accepté d'être cités : Stéphane Bura, Jack B. Fisher, Evelyn Fox Keller, Hisao Honda, Tsvi Sachs, Jerome C. Wakefield.

Enfin, je tiens à remercier vivement tous les membres du jury, dont, en particulier, les Professeurs David R. C. Hill et Daniel Parrochia qui ont accepté d'être rapporteurs.

PREMIERE EPOQUE : LE DERACINEMENT

INTRODUCTION : les commencements

Dans l'exposé de cette première époque, nous présenterons dans ses grandes lignes la situation de la formalisation de la croissance des plantes et de leur forme dans les décennies qui ont précédé l'apparition de l'ordinateur. Sans prétendre retracer ici l'histoire exhaustive de la morphologie quantitative dans les siècles passés, nous en rappellerons d'abord quelques jalons en nous attachant surtout au statut conféré au formalisme. Nous nous demanderons ensuite dans quel contexte plus précis la question de la mathématisation de la forme des plantes a trouvé un sens et s'est donc plus particulièrement posée à partir du 19ème siècle. Nous en viendrons alors au premier lieu de naissance de la méthode des modèles du point de vue du traitement des plantes. Et nous terminerons par l'exposé et l'analyse des différentes résistances à cette première naissance, qu'elles soient de nature physicaliste ou mathématiste.

L'intérêt des hommes pour la forme des plantes est probablement immémorial. Pourtant, il est remarquable que les peintures rupestres ne se focalisent le plus souvent que sur des formes animales pour des raisons que certains veulent attribuer à la plus grande proximité entre les hommes et les animaux et donc au plus grand pouvoir d'identification que recèleraient ces derniers pour les hommes[1]. De fait, il existe déjà un certain nombre d'ouvrages historiques concernant l'évolution du rôle symbolique des arbres et des plantes en général[2]. L'étude de l'arrangement des feuilles et des ramifications sur l'axe végétal a suggéré cependant assez tôt des tentatives de formalisation ou de quantification. Léonard de Vinci (1452-1519), de par sa perspective d'ingénieur, a été l'un des premiers à s'y intéresser de près en les apparentant, dans ses croquis et ses carnets, aux formes produites par les mouvements des fluides[3]. Ainsi lit-on chez lui une des premières formulations de loi quantitative en ce domaine : « Toutes les branches d'arbres, à quelque degré de hauteur qu'on les réunisse, sont égales à la grosseur du tronc » ou encore « tous les ans, quand les branches des arbres ont achevé de se développer, leur grosseur – si on les réunit toutes – équivaut à celle de leur tronc ; et à chaque stade de ramification, tu trouveras l'épaisseur dudit tronc […] »[4]. Fasciné par les régularités et les harmonies du monde naturel, Johannes Kepler (1571-1630) observa pour sa part la particulière fréquence du chiffre cinq dans l'arrangement des organes de la plante. Comme il existe également cinq solides réguliers, cette coïncidence ne lui paraissait pas un hasard. Par la suite, certains botanistes, comme Nehemiah Grew (1641-1712), rappelèrent périodiquement le fait que « les plantes invitent l'homme à des recherches mathématiques »[5]. Le naturaliste suisse Charles Bonnet (1720-1793) fut l'un des premiers à développer une méthode d'observation et de recueil systématiques de la forme des plantes. Dans ses *Recherches sur l'usage des feuilles dans les plantes* (1754), il avait remarqué que l'on pouvait placer les feuilles successives d'une même tige selon un arrangement spiral. Et il expliquait ce phénomène par un vitalisme assumé. En conformité avec la notion de « force vitale »,

---

[1] Cette idée a été soutenue par le botaniste Francis Hallé lors de sa conférence au colloque organisé par l'Université Paul Sabatier de Toulouse et par l'ADREUC (Association pour le Développement des Rencontres et des Echanges Universitaires et Culturels), à Carcassonne (3-5 juillet 2004), et dont le thème général était « Pour une éthique de la compréhension à l'ère planétaire ».
[2] Voir la bibliographie de [Dumas, R., 2002].
[3] Voir la section intitulée par l'éditeur « Symétrie de la nature. Ramifications des arbres et de l'eau » *in* [Vinci (de), L., 1508-1518, 1942, 1987], p. 323.
[4] [Vinci (de), L., 1508-1518, 1942, 1987], p. 323.
[5] [Jean, R. V., 1978], p. xvii.

cet arrangement devait selon lui assurer aux feuilles un moindre recouvrement mutuel de manière à laisser passer l'air entre elles[1]. En 1759, dans sa *Theoria Generationis*, le botaniste et physiologiste allemand Kaspar F. Wolff (1773-1794) proposa une théorie pour les processus de développement des plantes fondée sur une particulière attention au point de croissance apical ou « point végétatif »[2]. Mais c'est avec la naissance du terme de « morphologie » au 18ème siècle que l'idée de représenter mathématiquement la forme de la plante prend réellement son essor.

Morphologie et phyllotaxie géométrique

Le terme de « morphologie »[3] naît sous la plume de Goethe (1749-1832), dans un contexte intellectuel où l'influence de la philosophie de la nature et du vitalisme est grande[4]. En proposant cette nouvelle discipline de recherche et d'observation, il souhaite infléchir le projet qui animent les sciences de la vie d'une problématique de la classification vers une problématique de la genèse[5]. L'historien et germaniste Jean-Michel Pouget a montré combien, aux yeux de Goethe notamment, l'approche classificatoire de Linné (1707-1778) avait pour défaut de figer la représentation des plantes, d'en compartimenter les organes, de se fonder finalement sur le principe que la plante était « composée de parties considérées comme hétérogènes »[6]. Si l'on balaie rapidement du regard l'histoire de la morphologie à partir du début du 19ème siècle[7], on constate cependant que cette discipline nouvelle s'est progressivement transformée, d'un projet spéculatif qu'elle était initialement, en une discipline scientifique à visée essentiellement descriptive, singulièrement avec le développement de la « phyllotaxie »[8] conçue comme l'étude de l'arrangement des feuilles et des ramifications. Ce n'est pas ici le lieu de revenir sur les raisons complexes et précises de ce

---

[1] Avec l'eau, l'air était en effet considéré comme le principal « aliment » de la force vitale de « végétation ». Voir l'article de J.-F. Leroy *in* [Taton, R., 1961, 1995], p. 451. Voir [Jean, R. V., 1994, 1995], p. 2 et [Adler, I., Barabe, D. et Jean, R. V., 1997], p. 233.

[2] [Wardlaw, C. W., 1968], p. 1.

[3] Ce terme avait été initialement inventé par Goethe pour désigner l'étude de la génération continue et différenciante des formes chez les êtres vivants. Cette discipline devait s'opposer à la simple collecte et à l'archivage fixiste des formes du vivant. Or, Goethe préconisait que, dans cette approche, on ne recoure pas seulement à l'observable mais que l'on suppose un principe de formation invisible, une idée unique (au sens d'une idée régulatrice kantienne) virtuellement à l'œuvre dans chaque organe de l'être vivant. Ce principe était censé s'actualiser de façon diverse et différenciée selon le temps et le lieu. Voir [Goethe, J., 1790-1807, 1884, 1992], pp. 73-84. Pour l'influence de Schiller et de la troisième critique kantienne sur ce point, notamment à l'occasion d'un rapprochement avec le §80 de *La critique de la faculté de juger*, voir [Cassirer, E., 1945, 1970, 1991], pp. 103-113.

[4] Certains auteurs (J.-M. Pouget et B. Hassenstein que cite Pouget) ont rectifié cette qualification pour la philosophie du vivant propre à Goethe : ils l'ont baptisée « mécanisme vital » parce que Goethe, à la différence de Bonnet, ne prenait pas réellement au sérieux la notion de « force vitale » dans la mesure où elle fait encore indûment intervenir la notion mécaniste de « force ». Voir [Pouget, J.-M., 2001], pp. 107-112. Jean Petitot minore aussi cette interprétation platement vitaliste, mais en en faisant pour sa part non un « mécanisme vital » mais un « vitalisme sémiotique », un vitalisme du signe beaucoup plus que de l'essence et de sa téléologie : « Contrairement à ce qu'il en est chez Schelling, le principe entéléchique n'est pas chez Goethe téléologique. Il est sémiotique », [Petitot, J., 1989, 1995], p. 6.

[5] Voir [Cassirer, E., 1945, 1970, 1991], pp. 103.

[6] [Pouget, J.-M., 2001], p. 61. Dans son opuscule « Objet et méthode de la morphologie », Goethe s'exprimait en effet ainsi : « Lorsque les objets naturels, et surtout les êtres vivants, nous apparaissent de façon telle que nous souhaitons comprendre leur nature et leur activité dans l'ensemble, nous croyons parvenir au mieux à cette connaissance en les dissociant en leurs parties, et cette voie en effet est réellement propre à nous mener très loin. Il nous suffira de rappeler en quelques mots seulement aux amis du savoir comment la chimie et l'anatomie ont contribué à la compréhension et à une vue d'ensemble de la nature. Mais constamment poursuivis, ces efforts de dissociation ont aussi bien des inconvénients. Le vivant est bien décomposé en ses éléments, mais à partir de ceux-ci on ne peut le reconstituer et lui rendre la vie. Ceci est vrai déjà de nombreux corps inorganiques, et à plus forte raison pour les corps organiques », [Goethe, J., 1790-1807, 1884, 1992], p. 75.

[7] Voir l'article sur la « morphologie végétale » dans le chapitre botanique de J.-F. Leroy *in* [Taton, R., 1961, 1995], pp. 426-429.

[8] Du grec *phullon* : feuille, et *taxis* : ordre. Voir [Corner, E. J. H., 1964, 1970], p. 369. Le premier usage de ce terme remonterait aux années 1830. Voir [Jean, R. V., 1994, 1995], p. 2.

déplacement paradigmatique. Dans son travail de thèse, l'historien des sciences Stéphane Schmitt a notamment montré l'importance et la permanence du problème des parties répétées (différents organes d'un même individu semblant bâtis sur le même modèle) dans le passage des théories morphologiques d'inspiration idéaliste aux problématiques contemporaines de la biologie du développement[1]. Retenons simplement que, dans le cas des plantes, il a paru nécessaire à une approche mathématisante de trouver d'abord les moyens conceptuels de supposer une certaine homogénéité au-delà du caractère bariolé et visiblement hétérogène des phénomènes botaniques. Cette homogénéité des éléments est en effet supposée dans les formulations mathématiquement construites : la construction mathématique elle-même, quand elle reste de nature géométrique et analytique, se fonde sur elle. Or, il est indéniable que cette hypothèse de relative homogénéité entre organes (*via* la théorie de la métamorphose des feuilles[2]) se retrouvait davantage dans les spéculations idéalistes des philosophes de la Nature, et de Goethe en particulier, que dans les observations diversifiées et scrupuleuses des linnéens. Cela est paradoxal car on sait par ailleurs combien Goethe répugnait à l'idée que l'on puisse mathématiser la nature vivante. Mais il faut sans doute voir dans l'homogénéisation conceptuelle des organes une des raisons pour lesquelles c'est bien dans cette partie de la morphologie devenue entre-temps essentiellement descriptive qu'une certaine approche quantitative des formes végétales a pu produire ses premières formulations vérifiables empiriquement. Nous en toucherons ici un mot afin de mieux situer par la suite les nouvelles formes de mathématisation qui ont vu le jour au 20ème siècle avec le recours à des mathématiques nouvelles, mais aussi avec l'émergence de l'ordinateur.

La géométrie spirale : description précise mais sans explication ni application

Avec la théorie de la spirale génératrice, aperçue par Bonnet, suggérée par Goethe mais développée ensuite par les botanistes allemands Karl Friedrich Schimper (1803-1867) et Alexander Braun (1805-1877) à partir de 1830[3], c'est une approche de type arithmétique qui est d'abord mise à contribution, et cela avec un certain succès descriptif. Cette théorie partait de l'observation réitérée selon laquelle les feuilles ne se développent pas au hasard sur les axes végétatifs : on observe bien qu'elles s'insèrent successivement à chaque nœud[4] en ayant opéré pour leur propre axe une rotation d'un angle précis par rapport à l'axe de la feuille précédente. Ainsi, « la ligne qui passe par chacun des nœuds consécutifs dans un mouvement en vis autour de

[1] [Schmitt, S., 2000].

[2] La théorie goethéenne de la métamorphose a également eu un destin propre qui a été finement relaté par le botaniste et historien des sciences Michel Guédès. Voir [Guédès, M., 1969], [Guédès, M., 1972] et [Guédès, M., 1973]. Guédès y définit notamment la théorie de la métamorphose : c'est une théorie botanique qui « postule une homologie de structure entre les différents 'organes appendiculaires' végétatifs et floraux des Phanérogames… », [Guédès, M., 1969], p. 323. Chez Goethe, elle est une conséquence de la théorie du prototype végétal ou de *l'Urblatt* (feuille primitive) à partir de laquelle toute plante se constituerait par métamorphose. Mais, comme la plupart de ses contemporains, Goethe ne veut voir à l'œuvre que des causes mécaniques, plus particulièrement physiologiques, dans ce développement végétal. Ainsi, pour expliquer ce développement, il « mettait en cause l'épuration progressive des sucs de la plante », [Guédès, M., 1969], p. 346. Enfin, selon Guédès, qui nous paraît le plus sûr à ce sujet au vu de l'étendu de ses lectures botaniques, Linné aurait été en fait le premier à réellement comprendre l'intérêt de cette notion de métamorphose (la théorie de la métamorphose était présente chez lui « en germe ») mais il aurait pâti du caractère sibyllin mais non point allusif de ses écrits sur la question [Guédès, M., 1969] pp. 339-340. Il faudrait donc tempérer le jugement de Pouget sur l'opposition Linné/Goethe à ce sujet. C'est en fait plus tard de Candolle qui aurait le mieux su populariser cette théorie en ne l'exhumant que chez Goethe mais en la précisant toutefois [Guédès, M., 1973].

[3] Voir la préface de Irving Adler *in* [Jean, R. V., 1978], p. xiii. Voir également [Taton, R., 1961, 1995], p. 426 et [Adler, I., Barabe, D. et Jean, R. V., 1997], pp. 233-234.

[4] Les nœuds sont ces parties de la tige au niveau desquelles sont insérés feuilles et bourgeons [Gorenflot, R., 1977, 1998], p. 268.

la tige est une spirale ou hélice dite *spirale génétique*… »[1] En 1830, K. F. Schimper et A. Braun ajoutaient également la notion de divergence qui rendait compte de l'angle que forment deux feuilles successives de la même tige. Ils montraient que si l'on représente cet angle de divergence par une fraction reflétant le nombre de tours par feuille (exemple : 2/5 pour le prunier = il faut faire 2 tours autour de la tige pour obtenir 5 feuilles[2]), on tombe régulièrement sur un des nombres de la suite de Fibonacci[3] pour le numérateur, à savoir : 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, … Donc non seulement ces arrangements sont propres à chaque espèce de plante mais la plupart des plantes connues semblent manifester un angle de divergence inscriptible dans ce que l'on appelle à l'époque une « loi mathématique »[4]. L'expression « modèle mathématique » n'apparaît en effet aucunement dans ce contexte. De surcroît, cette « loi » est arithmétique car elle déploie des nombres entiers et elle est exprimée par une formule de récurrence que l'on retrouve par ailleurs dans de nombreux problèmes qui seront dits plus tard appartenir à la mathématique appliquée[5]. Cette apparition des nombres de Fibonacci ajoute une aura de mystère sur le phénomène de phyllotaxie. Ce qui n'avait pas échappé à Kepler qui, déjà en son temps, voulait voir dans les arbres une capacité à engendrer spontanément, et pour des questions d'harmonie, la suite de Fibonacci. Prolongeant ainsi les antiques suppositions pythagoriciennes, nombre d'auteurs y voient la marque d'une concordance mathématique présente jusqu'au cœur des choses vivantes.

Ce qui est donc pris en considération par cette mathématisation de la forme est principalement la situation relative des organes biologiques en termes de distance mesurable. Mais cette situation métrique est elle-même transformée en un décompte angulaire pour devenir une *loi arithmétique* faisant intervenir des nombres entiers. Il s'agit en effet d'un dénombrement d'unités d'angles. Ce type d'inscription en une « loi » arithmétique reste, on le voit, une mathématisation de nature fortement phénoménologique. C'est-à-dire que, malgré ce caractère très précisément descriptif et même prédictif[6], car vérifiable par des mesures en champ pour chaque espèce, la genèse des nombres de Fibonacci en elle-même ne prétend pas imiter un processus physico-chimique, physiologique ou métabolique qui amènerait à leur manifestation dans l'arrangement foliaire[7]. Cela est précisément dû au fait que, dans cette loi, les divers nombres de Fibonacci ne renvoient *pas aux différentes étapes successives de la croissance* d'un même individu d'une même espèce mais au contraire à *chacune des divergences possibles* et caractéristiques de chacune des espèces végétales ramifiées. C'est une représentation

---

[1] [Jean, R. V., 1978], p. 31. C'est l'auteur qui souligne.

[2] [Jean, R. V., 1978], p. 32.

[3] Képler a formalisé la suite de Léonard Fibonacci (13ème siècle) de la façon suivante : F(1) = F(2) = 1 ; F(n) = F(n-1)+F(n-2) C'est le mathématicien français Edouard Lucas qui lui donnera le nom de « suite de Fibonacci ». Voir [Jean, R. V., 1978], p. 23 et [Jean, R. V., 1983], p. 262. Rappelons que ce marchand de Pise avait voulu ainsi évaluer le nombre de paires de lapins naissant à chaque génération si l'on part d'un seul couple de lapins (donc d'une seule paire).

[4] [Taton, R., 1961, 1995], p. 426.

[5] Les études sur les développements et les applications des suites de type Fibonacci sont en nombre considérable. En 1963, V. E. Hoggatt a créé avec A. Brousseau la revue *Fibonacci Quarterly* autour de la *Fibonacci Association* [Jean, R. V., 1978], p. 29. Cette expression de « mathématique appliquée » est relativement récente. Alors que nombre de mathématiciens, à partir du 19ème siècle, se firent une spécialité d'abstraire leurs objets (notamment pour répondre à des besoins de plus en plus pressants d'unification, de clarification et de systématisation des mathématiques) au point de ne plus leur chercher immédiatement des corrélats dans la réalité physique ou expérimentale, une quantité toujours plus importante de chercheurs travailla à traduire et à rendre applicables certaines de ces nouvelles structures ou théories mathématiques conçues par leurs collègues. Voir l'article de Jean Dieudonné *in* [Taton, R., 1964, 1995], pp. 122-127.

[6] Ce qui est prédit est le fait que lorsque l'on se trouvera devant une plante nouvelle on mesurera à peu près toujours un angle de divergence exprimable par le modèle de Fibonacci.

[7] Ainsi, pour rendre compte de l'apparition des nombres de Fibonacci aux numérateurs et aux dénominateurs du facteur multipliant les angles de divergences, Alexander Braun propose encore une « explication » très proche de celle de Képler. Il invoque le fait que la nature choisit la plus simple parmi les séries de fractions continues. Voir [Adler, I., Barabe, D. et Jean, R. V., 1997], p. 234.

mathématique interspécifique, transversale si l'on peut dire, et non pas longitudinale. Elle représente les cas possibles de ce phénomène naturel de spirale tel qu'il se présente à son issue, elle ne reproduit pas la mise en place du phénomène. En effet, le processus mathématique de construction de la loi (par récurrence) ne prétend pas imiter lui-même le processus de mise en place des phénomènes réels qui seront ensuite néanmoins conformes à l'expression finale de cette loi. C'est en cela que la loi n'explique pas le processus de ramification. Elle n'est pas pour autant un modèle avant l'heure. Car elle reste un idéal, statique il est vrai, mais pas une loi génératrice pour une ontogenèse, même si Schimper et Braun ont prétendu qu'une hélice unique présidait à l'implantation foliaire d'une tige.

Sans *explication* proprement dite autre que la vague invocation d'une influence inductrice sous-jacente, ce modèle de phyllotaxie était également dépourvu d'*application* effective. Tout au plus était-il « opérationnel », parce qu'étonnamment prédictif, mais pour une admiration et une contemplation au sens des promoteurs d'herbiers et des « cabinets de curiosité » du 18ème siècle.

Sans subir de grandes différences de nature, mais en se précisant cependant, cette première mathématisation systématique va par la suite susciter des représentations en géométrie plane (Auguste et Louis Bravais en 1837) puis en géométrie dans l'espace. Ces lois seront alors couramment enseignées en morphologie descriptive pendant près de 100 ans. Il faut attendre le livre du botaniste et physiologiste allemand Wilhelm Hofmeister (1824-1877), *Allgemeine Morphologie der Gewäche*, paru en 1868, pour disposer des premières hypothèses explicatives de nature mécaniste. L'idée d'Hofmeister est que la mise en place des feuilles se fait dans le plus grand espace libre. Il recherche donc un mécanisme très général qui puisse valoir pour toutes les plantes. Cependant, ses travaux isolés et non traduits, ne recevront un écho qu'au début du 20ème siècle.

La mathématisation des formes du vivant : une curiosité

Pendant le 19ème siècle, les tentatives de mathématisation des formes du vivant, même si elles se développent, resteront en fait des curiosités relativement marginales et cela pour deux raisons bien différentes mais complémentaires. D'une part, en biologie des plantes et en particulier en France, sous l'influence des idées de Claude Bernard, règne la conviction de l'impossible expérimentation sur les formes comme d'une impossible explication simplement physiologique de ces mêmes formes. Donc tout essai de représentation rigoureuse et formalisée de la forme des êtres vivants semble de peu d'intérêt. En effet, la forte fixité transgénérationnelle de la forme des individus d'une même espèce indique que l'on ne peut avoir affaire ici à une grandeur contrôlable, au contraire des autres paramètres physiologiques accessibles à l'expérimentation[1]. De plus, comme l'indique Claude Bernard lui-même, « un *protoplasma* identique dans son essence ne saurait donner origine à tant de figures différentes »[2]. La matière vitale actuelle seule ne semble donc pas pouvoir receler l'explication de la mise en forme si diversifiée des êtres vivants. Si donc, comme Claude Bernard et une grande partie de la biologie française, on privilégie une interrogation sur ce qui est susceptible de devenir ou non un paramètre de contrôle dans une

[1] Voir [Pichot, A., 1993], pp. 745-756. Pour Claude Bernard, l'explication de la forme, sous l'espèce d'une « force évolutive métaphysique » irréductible à l'approche physiologique car irréductible à des forces physiques (*ibid.*, pp. 754-755) était à rechercher dans le passé contingent des êtres vivants et donc dans leur hérédité. Par là, l'explication de la forme se rattachait à « l'harmonie préétablie des causes initiales ».
[2] Extrait des *Leçons sur les phénomènes de la vie*, 1893, Librairie Baillière, p. 293, cité par [Pichot, A., 1993], p. 746.

expérimentation physiologique bien menée, on comprend que la forme n'apparaisse pas un objet d'étude pertinent.

Mais d'autre part, l'approche d'abord essentiellement classificatoire des naturalistes et des botanistes des 18ème et 19ème siècles, dont Bonnet, attentive à la diversité de ce qui est immédiatement visible, n'encourage pas non plus, bien au contraire, à tenter d'unifier sous des principes formels, même élémentaires, ces diverses formes du vivant. À l'inverse de la vision « métamorphique » de Goethe, la forme de la plante était majoritairement conçue par les botanistes comme une colonie de petits éléments hétérogènes et disposant chacun d'une figure propre. Mais bien que Linné ait en fait aperçu cette possibilité métamorphique avant Goethe, les botanistes n'allaient pas jusqu'à faire procéder ces divers éléments d'un même « être de raison » originaire, même s'ils semblaient procéder du même point végétatif.

Que l'on soit donc muni d'une approche bernardienne ou linnéenne, la même question pouvait légitimement se poser : à quoi bon chercher à représenter précisément ce qui d'une part semble varier très faiblement et de façon peu contrôlable au niveau de la vie d'un individu et qui, en même temps et d'autre part, varie très fortement d'une espèce à une autre voire à l'intérieur d'une même espèce ?

C'est finalement le darwinisme et le développement afférent de la biométrie puis surtout de la génétique mendélienne qui vont lentement ébranler ces considérations, au tournant du siècle. Dès le départ, Mendel était en effet persuadé que les unités qu'il avait isolées dans ses expériences de croisement devaient contrôler la morphologie des êtres vivants. Certains botanistes se prirent donc à nouveau à rêver à la possibilité de concevoir des lois morphologiques formelles dès lors qu'elles pouvaient être éventuellement incarnées[1] dans ce que Mendel avait mis en évidence et que Wilhelm Johanssen (1857-1927) appellera plus tard, en 1912, les gènes[2]. Cette possible incarnation d'un support pour des lois mathématiques régissant des formes soulageaient ceux que la spéculation idéaliste incommodait mais qui ne désespéraient pas de toute théorisation des formes biologiques.

Cependant, avant le triomphe de la génétique, donc au début du 20ème siècle, la phyllotaxie, est encore étudiée, mais « sporadiquement »[3] et du point de vue seulement histologique, c'est-à-dire par l'analyse anatomique des tissus organiques et notamment du méristème[4]. La « spirale géométrique » de Goethe est reléguée au rang d'un pythagorisme ou d'un platonisme désuet et n'est tolérée que comme description géométrique seconde d'un phénomène avant tout physiologique. L'heure est donc à l'explication seulement physiologique et localiste de la mise en forme[5]. Et l'on se concentre pour ce faire sur la physiologie du méristème pour tâcher d'élucider les causes des trois phénomènes principaux qui l'affectent : croissance en longueur, phyllotaxie et ramification. La botanique descriptive recherche surtout la précision des descriptions qualitatives de ces divers phénomènes de croissance et de morphogenèse,

---

[1] Et non plus seulement soutenues dans des « vues de l'esprit » (selon les termes de Michel Guédès parlant de l'*Urblatt*).

[2] Les remarques de la préface du biologiste théoricien Robert Rosen au livre de son collègue Roger Jean vont dans ce sens : [Jean, R. V., 1983], p. ix.

[3] Selon J.-F. Leroy *in* [Taton, R., 1964, 1995], p. 762.

[4] Terme dû au botaniste allemand Th. Naegeli (1817-1891) et qui désigne « les régions embryonnaires caractérisées par la capacité des cellules à se diviser activement (sommet ou apex des tiges à l'intérieur des bourgeons) », [Taton, R., 1961, 1995], p. 428. Le botaniste E. J. H. Corner définit ainsi le *méristème* : « (Du grec *meris* = partie et *stema* = filament.) Tissu dont sont constitués les régions embryonnaires. C'est un tissu jeune dont les cellules sont en voie d'active division […] Au début du développement de la plante, l'embryon est entièrement méristématique, mais très rapidement, les méristèmes se localisent aux extrémités des organes », [Corner, E. J. H., 1964, 1970], p. 361. C'est ce que l'on appelle alors plus communément des *bourgeons*.

[5] Voir l'historique de [Wardlaw, C. W., 1968], p. 2.

l'unification terminologique (qui est un vrai problème eu égard aux différentes échelles d'observation des plantes, aux différents niveaux d'organisation végétal valorisés et aux différents objectifs des observateurs), ainsi que l'interprétation physiologique[1]. Au début du 20ème siècle, enfin, l'organographie se développe. Cette sous-discipline liée aux études de morphologie descriptive se concentre plus particulièrement sur la relation entre la forme et la fonction dans une perspective darwinienne. Pour ce faire, les organes sont considérés à un stade de plein développement. Dans cette approche, le processus de leur développement dans l'ontogenèse n'est donc pas un objet d'étude privilégié[2].

La critique de toute idéalisation mathématique : les « hélices foliaires » de Plantefol

Par ailleurs la « théorie des hélices foliaires » que le botaniste français Lucien Plantefol (1891-1983) met en place à partir de la fin des années 1920 et qui reçoit l'assentiment d'une grande partie des botanistes dès la fin des années 1940, est pour beaucoup dans la désaffection de ces derniers pour les représentations mathématiques simplificatrices, spécifiquement en France :

« Expliquer la phyllotaxie d'une tige, ce n'est pas trouver des relations numériques entre les points représentatifs des feuilles et dont on aura, idéalement, rectifié la position sur une tige théoriquement rectifiée à une forme géométrique. C'est reconnaître les rapports *qui existent sur la tige réelle* entre les éléments réels*… C'est aussi mettre en accord les résultats ainsi obtenus avec l'étude du point végétatif d'où proviennent tige et feuilles. »*[3]

Dans ce passage, on comprend que Plantefol reproche à la théorie de Schimper et Braun de se livrer à une succession d'idéalisations géométriques pour faire coller la réalité botanique à des formes simples. Schimper lui-même admettait que ses angles fractionnaires étaient des approximations et qu'il fallait systématiquement leur ajouter une valeur corrective pour les ajuster à la réalité. Sur ce point, Plantefol endosse donc une partie des arguments du botaniste allemand Julius von Sachs (1832-1897) pour qui toute théorie mathématique de la phyllotaxie devait être rejetée au motif qu'elle ne peut pas être autre chose qu'un pur jeu ou qu'une simple projection subjective[4]. De même, pour Plantefol, une telle théorie mathématique ne tient pas compte de la réalité phyllotaxique d'une part parce que, selon Robert Gorenflot, un élève de Plantefol, « la tige est assimilée à un cylindre et les insertions foliaires à des points »[5]. Or ce n'est pas seulement simplifier, mais c'est nier toute la réalité botanique de ces insertions que de les faire figurer par des points géométriques sans extensions. D'autre part, précise Gorenflot, « il est souvent impossible

[1] Voir l'exposé historique des botanistes Yves Caraglio et Daniel Barthélémy *in* [Bouchon, J., 1997], pp. 11-14.
[2] Voir [Wardlaw, C. W., 1968], p. 3.
[3] Extrait tiré de l'article « Sur les méthodes en phyllotaxie » de Plantefol, paru *in Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, 1946, Tome 222, pp. 1508-1510, cité, sans précision de la page, par [Gorenflot, R., 1977, 1998], pp. 31-32. C'est l'auteur (Plantefol) qui souligne.
[4] [Adler, I., Barabe, D. et Jean, R. V., 1997], p. 236. Sachs précisait : « puisqu'en outre aucune relation réelle n'a été établie entre cette méthode et l'histoire du développement ou la classification des plantes ou encore la mécanique de la croissance, en dépit de nombreuses observations, il me semble absolument impossible d'imaginer quelle valeur la méthode peut avoir pour un aperçu plus profond sur les lois de la phyllotaxie » ; notre traduction du texte suivant : "since moreover no actual relationship of the method to the history of development, to the classification of plants, or to the mechanics of growth, has been established, it seems to me absolutely impossible to imagine what value the method can have for a deeper insight in the laws of phyllotaxis", *Textbook of Botany*, London, 1882, cité, sans indication de page, par [Adler, I., Barabe, D. et Jean, R. V., 1997], p. 236.
[5] [Gorenflot, R., 1977, 1998], p. 31.

de tracer une spirale génératrice unique à laquelle corresponde une divergence constante »[1]. Autrement dit, la représentation mathématique à laquelle Schimper et Braun arrivent est sous-déterminée par les observations. Il serait donc vain de la penser en lien direct avec un scénario explicatif sous-jacent et unique. Du fait de sa non-unicité, une telle représentation fortement idéalisée, alors même qu'elle prétend condenser un processus biologique en une loi mathématique simple de façon à nous en faire saisir la clé et l'explication au moyen du décèlement d'une cause qui se voudrait profonde et unique, nous éloigne en fait de toute forme de scénario explicatif. Enfin, Plantefol avait observé qu'une grande partie des cas de phyllotaxie que l'on rencontre dans la nature, qu'ils soient normaux ou anormaux, ne sont en fait pas descriptibles par une telle idéalisation forcée[2]. En multipliant des observations déconcertantes au regard de cette loi, Plantefol a ainsi progressivement travaillé à saper la proposition de mathématisation de Schimper et Braun. Il montre que la théorie de la spirale peut être sauvée si elle devient une théorie des parastiques, c'est-à-dire une théorie des « spirales parallèles » reliant les feuilles de deux en deux ou de trois en trois, etc., de manière à ce que l'on tombe toujours sur une spirale définie rigoureusement d'un point de vue géométrique. Mais c'est là briser la recherche d'unité de ses prédécesseurs.

C'est que son approche ne se situe pas à la même échelle d'observation : il part du point végétatif, c'est-à-dire du lieu où se mettent en place les ébauches des feuilles. Ces dernières sont visibles à l'œil nu ou bien au microscope optique. Or, Plantefol constate que le point végétatif ébauche des feuilles contiguës et successives (c'est-à-dire appelées à apparaître successivement sur la tige) sous la forme d'une ou de plusieurs hélices préformées. Il observe que peuvent exister trois formes de contiguïtés pour chacune de ces hélices foliaires : par juxtaposition, par chevauchement ou par superposition[3]. Il renonce donc à employer la notion de divergence angulaire pour lui préférer celle de contiguïté. Observons à ce sujet qu'une telle notion, à la différence de celle de divergence, reste conceptuellement manipulable sous une forme purement verbale, c'est-à-dire non géométrisée ou mathématisée. L'ambitieuse *unicité* de la spirale génératrice est ainsi remplacée par la plus réaliste *multiplicité* des hélices foliaires observées en leur ébauche. Cette multiplicité des hélices rend superflu tout recours à une théorie complexifiée des divergences angulaires puisqu'il est finalement plus aisé de décrire la phyllotaxie d'une espèce végétale par la liste et la qualification (la notification qualitative) de chacune des hélices foliaires qu'elle présente. Par exemple, Plantefol parlera d'une « hélice à contiguïté par juxtaposition et tournant à dextre »[4].

C'est bien cette possibilité de décrire une multiplicité d'hélices foliaires qui renforce le pouvoir descriptif de la théorie de Plantefol par rapport à celle de Schimper et Braun. De fait, selon Gorenflot, une telle théorie « rend compte de toutes les dispositions foliaires observées dans la nature, normales ou anormales… »[5] La théorie de Plantefol gagne en réalisme et en fidélité au prix d'*un morcellement du dispositif d'idéalisation*. C'est la diversification et le morcellement des idéalisations (les hélices) qui permet à la description théorique de suivre de plus près les linéaments du réel. Mais, en retour, ce morcellement rend ensuite impossible et inutile toute

[1] [Gorenflot, R., 1977, 1998], p. 31.
[2] [Gorenflot, R., 1977, 1998], p. 31.
[3] [Gorenflot, R., 1977, 1998], p. 33.
[4] Dans la différence entre les hélices tournant à gauche (sénestres) et les hélices tournant à droite (dextres), on peut voir un résidu de recours à une représentation géométrique. Toutefois, Plantefol choisit des termes non techniques alors que, sur ce point tout au moins, il aurait pu davantage recourir au langage géométrique avec la convention du sens inverse trigonométrique, et du sens trigonométrique. C'est, selon nous, un signe supplémentaire de son aversion pour les mathématisations, pratiques qu'il juge bien souvent trompeuses et idéalisantes à l'excès.
[5] [Gorenflot, R., 1977, 1998], p. 34.

tentative de mathématisation ultérieure car la condensation et le pouvoir de combinaison des formalismes qu'elle apporterait, quand bien même elles seraient concevables, seraient minimes par rapport à la commodité que la théorie verbale présente déjà en elle-même.

Pendant plusieurs décennies, l'école française de botanique adopte des vues proches de celles de Plantefol. C'est avec elle que la botanique apprend à aborder les problèmes de morphogenèse et de phyllotaxie à partir des méristèmes et non plus seulement à partir d'une description à l'échelle des feuilles et des rameaux déjà constitués et disposés[1]. À ce titre, la phyllotaxie descriptive française du milieu du 20ème siècle garde longtemps encore une tendance à se méfier des représentations mathématisées.

C'est aussi une des raisons particulières pour laquelle la France ne sera pas avant longtemps, c'est-à-dire avant les années 1960, un terreau privilégié pour la développement de la biologie théorique. Une autre raison, plus générale et bien connue des historiens de la biologie moléculaire et de la génétique notamment[2], est la faveur dans laquelle la physiologie fut longtemps tenue en France par contraste avec le contexte des recherches anglo-saxonnes (Etats-Unis, Grande-Bretagne dans une moindre mesure), par exemple. Comme l'historien des sciences Scott Gilbert l'a montré, la recherche américaine souffrira en effet rapidement du gouffre qui semblera en revanche se creuser pour elle entre la génétique formelle et l'embryologie[3]. Cette absence de lien clair entre les théories de la morphogenèse et les théories de l'hérédité contribuera pour une part non négligeable à l'émergence d'une sorte de biologie théorique de type anglo-saxon dès après la première guerre mondiale.

Mais auparavant, l'idée, pythagoricienne dans le fond, selon laquelle il faudrait trouver des « lois mathématiques » qui non seulement traduiraient mais incarneraient même l'essence des phénomènes morphologiques sera profondément remise en question par les premiers développements de ce qui sera appelé, plus tard, la « méthode des modèles ». En effet, à partir des années 1920, les travaux de la biométrie sont de toute façon en plein essor, notamment du fait de la mise à disposition de nouveaux instruments statistiques, mais aussi et surtout à cause d'un souci essentiellement empirique, beaucoup plus que théorique, dans la plupart des études agronomiques, comme dans certains travaux physiologiques. C'est dans ces deux contextes que, pour ce qui concerne la forme de la plante, le déracinement des formalismes sera consommé.

Dans les deux prochains chapitres, nous rappellerons donc l'esprit de quelques travaux importants qui, dans les années 1920 et 1930, se focalisent sur la mesure et la représentation mathématique de la croissance des êtres organiques mais sans égard particulier pour leur configuration spatiale précise, c'est-à-dire pour leur morphologie individuelle. Ces premiers travaux statistiques sont ainsi surtout consacrés au dimensionnement de la masse organique (poids) ou de la taille (longueur, surface) d'un organe ou d'un organisme pris en sa totalité et à son évolution dans le temps. Ils s'enracinent davantage dans une perspective d'explication en physiologie animale ou de sélection végétale, en agronomie notamment. Les structures topologiques de ramifications, les arrangements, les angles et les sections de rameaux n'y sont donc pas considérés comme essentielles.

Notre objectif ici n'est pas d'en rapporter l'histoire précise mais d'en restituer certains épisodes afin de rappeler l'esprit et l'épistémologie qui les animent. Cela est important dans la mesure où c'est en particulier chez ces auteurs que la notion de « modèle mathématique » va s'épanouir pour la première fois dans les problématiques de forme qui nous intéressent, sans que

[1] Voir le chapitre de J.-F. Leroy *in* [Taton, R., 1964, 19995], p. 762.
[2] Voir [Morange, M., 1994], chapitre 14.
[3] Voir [Gilbert, S. F., 1988].

l'expression y apparaisse telle quelle, toutefois, avant la fin des années 1940. Les travaux qu'ils produiront en matière de mathématisation de la forme du vivant vont se confronter longtemps et avec succès, du point de vue des vérifications empiriques, aux théorisations de la morphogenèse qui resteront à scénario physicochimique. C'est notamment le cas en France avec les travaux de biométrie et d'embryologie de Georges Teissier (1900-1972). Dans la biométrie française, nous verrons que cette figure de la biologie est d'autant plus importante, particulièrement pour la modélisation de la croissance, qu'elle conditionnera longtemps le sens de ce qui devait s'appeler plus tard un « modèle mathématique ». Mais, significativement, cette désignation n'existe pas encore en tant que telle dans les travaux de Teissier et elle ne sera définitivement adoptée par la biométrie française que lorsque, devant l'ordinateur notamment, elle rapprochera finalement sa propre épistémologie de la formalisation mathématique de celle, d'abord franchement opposée, de la biophysique mathématique et de la cybernétique.

Cependant, notre restitution de la biométrie ne serait pas intelligible si nous n'évoquions préalablement le sens plus général de l'émergence de la modélisation statistique dans l'agronomie anglaise des années 1920. Teissier lui-même en hérite directement. À partir de la deuxième moitié du 19ème siècle, ce sont en effet les travaux des biométriciens et eugénistes anglais qui ont consisté en une application systématique de l'analyse statistique aux données de terrain. Ils introduisirent ainsi l'usage d'une nouvelle forme de mathématique, dite descriptive, donc « modélisatrice » en ce sens, dans la pratique agronomique.

CHAPITRE 1 - La « loi mathématique » hypothétique de R. A. Fisher (1922)

À l'heure où la botanique apprend à relativiser la valeur des lois phyllotaxiques, les recherches en agronomie et physiologie bénéficient des derniers développements de la méthode expérimentale proposés par l'école de biométrie anglaise. La notion de biométrie avait été introduite par le statisticien anglais Francis Galton (1822-1911) pour désigner la discipline dans laquelle on applique les méthodes de la statistique à la biologie[1]. Un de ses buts avoués était de donner des outils rigoureux pour tester quantitativement la théorie darwinienne. Bien qu'il ne s'agisse donc pas d'une tentative de *représenter* mathématiquement les êtres vivants mais plutôt d'une méthode d'extraction d'un maximum d'*informations* à partir de données d'expérimentations entremêlées, il est nécessaire de rappeler ici quels sont certains des nouveaux développements de la biométrie anglaise dans les années 1920 car, d'une part, en élargissant la pratique expérimentale et en la libérant de certaines contraintes, ils contribuent fortement à augmenter la testabilité des formalisations du vivant. D'autre part, et en particulier avec le physicien, statisticien et eugéniste anglais Ronald Aylmer Fisher (1890-1962), en poste dans une station d'agronomie, cette pratique statistique introduit le concept de « loi mathématique »[2] probabiliste et hypothétique dans les sciences du vivant. Or, par ailleurs, on sait qu'en 1946, le statisticien suédois Harald Cramèr se réfèrera au concept de Fisher en recourant cette fois-ci à l'expression de « modèle statistique » créant le terme et mariant ainsi l'approche modéliste de la théorie continentale des probabilités, et ses développements en mécanique statistique, avec la statistique biométrique anglo-américaine[3]. C'est donc dans les travaux de Fisher du début des années 1920 que la biométrie a pour la première fois eu recours à un concept directement assimilable à celui de modèle statistique. C'est là également que la forme et la croissance des plantes sont systématiquement abordées avec un nouvel outillage formel, celui des statistiques. Mais qu'est-ce que Fisher désigne sous le vocable de « loi mathématique » probabiliste et hypothétique à partir de 1922 ? Afin de mieux le comprendre, il nous faut rappeler succinctement le contexte dans lequel Fisher crée ce concept[4].

Fisher a été formé, à Cambridge, en physique et en mathématiques. Il a une formation poussée en mécanique statistique. Il suit les cours de mécanique de James Jeans (1877-1946) comme les cours de théorie des erreurs de l'astronome F. J. M. Stratton (1881-1960). Après une période d'enseignement, sa forte myopie l'empêche de pratiquer la physique expérimentale comme il le souhaitait. Il s'engage alors dans des travaux plus mathématiques et statistiques. À

---

[1] À partir de 1888, Galton avait introduit la notion de « corrélation » pour formaliser la liaison entre deux variables aléatoires. Voir l'article de G. Darmois *in* [Taton, R., 1961, 1995], p. 77.

[2] "Consequently, it should be clear that the concept of a frequency curve includes that of a hypothetical infinite population, distributing according to a *mathematical law*, represented by the curve. This *law* is specified by assigning to each element of the abscissa the corresponding element of probability", [Fisher, R. A., 1922], p. 312. C'est nous qui soulignons.

[3] [Gigerenzer *et al*, 1989, 1997], p. 111.

[4] Cette histoire est assez bien connue et a déjà été rapportée, notamment par [Mackenzie, D. A., 1981], [Gigerenzer *et al*, 1989, 1997], [Desrosières, A., 1993, 2000], pp. 349-353, [Segal, J., 1998], chapitre Ib et [Segal, J., 2003], chapitre 1. Voir également la contribution de l'historien R. Olby dans les actes du colloque « R. A. Fisher et l'histoire de la génétique des populations », *in* [Roger, J. *et al*., 1981], pp. 251-289. Pour les besoins de notre étude sur les formalismes mathématiques en biologie, nous ne ferons ici que rappeler les grandes lignes des travaux de Fisher avant de nous appesantir un peu plus sur l'épistémologie du modèle qui s'y dévoile.

partir de 1919, à cause d'un différend avec le statisticien Karl Pearson (1857-1936), il refuse d'être embauché au *Galton Laboratory* et choisit le poste de responsable du département de statistiques de la station agronomique de Rothamsted[1]. Fisher y a pour mission urgente de traiter une masse de données concernant une grande variété de traitements chimiques appliqués à divers types de cultures sur différents types de sols. L'objectif est d'essayer d'extraire de ces données une information sur l'existence ou non d'une influence des traitements chimiques sur la production végétale. Comme de nombreux facteurs interviennent simultanément (la variété du végétal, le sol, les substances chimiques répandues, le climat, etc.), qu'il n'est pas possible de dissocier leurs contributions respectives les unes des autres et que, pour une expérimentation agronomique particulière on ne dispose le plus souvent que d'un petit nombre d'échantillons[2], il préconise des expérimentations par blocs où chaque bloc présente une combinaison particulière de chacun des facteurs précédemment évoqués (carrés latins). Ces blocs sont disposés dans l'espace par randomisation, c'est-à-dire de façon aléatoire, afin que l'expérimentateur soit certain de ne pas introduire de biais dans la situation des blocs les uns par rapport aux autres, surtout eu égard à la qualité inégale et non contrôlable du sol[3], de l'exposition, du ruissellement, etc. En introduisant artificiellement un aléa, Fisher peut limiter la conséquence fâcheuse sur l'estimation des paramètres qu'entraînerait sinon le faible nombre d'expérimentations contrôlées. Le « plan d'expérience »[4] qu'il préconise consiste donc finalement en un ensemble d'expérimentations aléatoires et comparatives.

La méthode statistique préconisée par Fisher intervient à ce niveau-là. Elle consiste en une analyse de la production de ces différents blocs au regard des divers facteurs contrôlés et notamment au regard de l'apport d'engrais. Or, selon Fisher, on ne peut pas faire parler les données sans *disposer préalablement* de la représentation mathématisée d'une population hypothétique[5]. Les données doivent en effet être considérées comme formant un échantillon aléatoire d'une population infinie de faits. Il faut donc distinguer très clairement (ce que, selon Fisher, les bayésiens[6] n'ont pas fait) entre la *population* hypothétique et *l'échantillon pris dans cette population* que constitue l'ensemble des données observationnelles[7]. Fisher s'inspire ici de la

---

[1] Pour tous ces rappels biographiques, voir [Segal, J., 2003], p. 33.

[2] On ne peut donc appliquer la loi dite des « grands nombres ».

[3] Sur l'hétérogénéité du sol, voir [Fisher, R. A., 1926], pp. 503 et 509.

[4] C'est ce que Fisher appelle le "*design of experiment*". Nous pourrions proposer de traduire ici *design* par « conception » au sens d'une planification conceptuelle suivie d'une fabrication. Mais cette traduction présente tout de même un inconvénient. En fait, Fisher n'effectue pas lui-même les expérimentations mais il en conçoit bien le *plan*, le *design* également en ce sens quasi-architectural. Si bien que, d'ailleurs, le *plan* expérimental peut être conçu *après* que les expérimentations sur le terrain aient effectivement eu lieu comme cela a été en fait le plus souvent le cas à Rothamsted, à l'arrivée de Fisher. Voir [Fisher, R. A., 1962], p. 528 : "… yet a different design involving little *or no additional experimental labour* increase the precision two-fold, or five-fold or even more…" C'est nous qui soulignons. La planification devient donc postérieure à l'expérimentation. Ce qui prouve que cette planification procède bien d'une stratégie de présentation et de mise en forme d'informations déjà acquises par ailleurs.

[5] [Gigerenzer, G. *et al*, 1989, 1997], p. 75.

[6] Le théorème de Thomas Bayes (1702-1761) porte sur qu'il appelle la « probabilité des causes », c'est-à-dire sur « la probabilité *a priori* des diverses causes possibles d'un événement », [Borel, E., 1950, 1969], p. 34. Il permet, « à partir d'une loi de probabilité *a priori*, de dire comment les résultats de l'observation la modifient », [Taton, R., 1964, 1995], p. 98. Selon Fisher (in [Fisher, R. A., 1925, 1946, 1947], p. 16), c'est la première fois que le calcul des probabilités est conçu comme un instrument de raisonnement inductif. Or, pour que ce théorème soit valable au sens où Bayes l'entend, il faut postuler que la cause est une variable aléatoire. Les bayésiens sont ceux qui, selon Fisher, ne virent pas d'inconvénient à faire ce postulat qui gênait pourtant déjà Bayes. Fisher va sortir de l'impasse en proposant la notion de « vraisemblance » à la place de celle de « probabilité *a priori* », cette notion n'ayant pas tout à fait les mêmes propriétés mathématiques exigeantes que celle de « probabilité ».

[7] "During the rapid development of practical statistics in the past few decades, the theoretical foundations of the subject have been involved in great obscurity. Adequate distinction has seldom been drawn between the sample recorded and the hypothetical population from which it is regarded as drawn. This obscurity is centred in the so-called 'inverse' methods", [Fisher, R. A., 1922, p. 366. Dans la dernière phrase, Fisher fait allusion à l'approche bayésienne dite de la

théorie des erreurs telle qu'elle est pratiquée pour les mesures astronomiques depuis les travaux de Carl-Friedrich Gauss (1777-1855) sur la distribution normale ou en « cloche » et qui, plus tard, sera dite « gaussienne ». Cette théorie utilise déjà des tests de signification (par la méthode des moindres carrés). Elle le fait non pour rejeter directement des hypothèses théoriques fondées sur les données mais pour rejeter les données aberrantes au vu d'une distribution des mesures jugée sinon normale[1]. Cette distribution dite « normale » autour de la moyenne est donc supposée *a priori*. Suivant cet exemple, selon Fisher, pour tirer une information des données, il faut au préalable « construire une population hypothétique infinie »[2] de faits observables car ce ne sont pas les nouvelles données qui devront dicter la forme de cette loi. Et la « spécification »[3] consiste en l'imposition d'une « forme » spécifique pour la représentation mathématisée appelée par Fisher « loi mathématique » de la population hypothétique. Pour des raisons de praticabilité, cette « forme » doit être choisie parmi celles qui sont *a priori* aisément manipulables dans les calculs[4]. Cette notion fishérienne de « loi mathématique » généralise donc en quelque sorte celle de « loi de Laplace-Gauss ».

Selon la suggestion de [Gigerenzer *et al*, 1989, 1997][5], et suivant en cela le statisticien A. P. Dawid, il nous est possible de formaliser simplement le propos de Fisher. En effet, pour disposer d'une telle « loi mathématique » au sens de Fisher, il faut en fait rassembler une variable X observable sur un échantillon donné d'une population (finie ou infinie), un paramètre Θ supposé être une caractéristique de la population en question et enfin, pour toutes les valeurs x de X et θ de Θ, une fonction de probabilité $p(x ; \theta)$ précisant la probabilité d'observer x si θ[6]. Selon Fisher, une observation nous donne une *information pertinente* sur le paramètre si la probabilité de faire cette observation varie effectivement en fonction du paramètre. C'est cette fonction de probabilité qui remplace la notion bayésienne, éminemment contestable selon Fisher, de probabilité *a priori*. Car, dans sa propre « conception de l'expérimentation », le rôle de l'analyse statistique se cantonne à la comparaison de la « loi mathématique » hypothétique avec l'hypothèse nulle, c'est-à-dire au passage d'un test de signification effectué au regard des données mesurées. Or, la vraisemblance du pouvoir causal entre un facteur contrôlé et une production végétale, dès lors qu'elle est évaluée de cette manière est, selon Fisher, bien moins contestable que celle à laquelle on aboutit avec la solution des bayésiens.

La signification de la mathématisation chez R. A. Fisher

Fisher s'inscrit explicitement dans la lignée des biométriciens et il reprend à Francis Galton l'idée que la biométrie est cette discipline qui, par excellence, se trouve être sensible à la *variabilité*

« probabilité inverse » dans laquelle on résout le problème de la probabilité *a priori* en « étendant l'idée de probabilité à des inférences concernant des populations d'après des hypothèses ou des observations basées sur des séries *limitées* », [Fisher, R. A., 1925, 1946, 1947], p. 8. C'est nous qui soulignons. Au contraire, la « loi mathématique » que Fisher propose fait appel à une *infinité* hypothétique d'observables et peut constituer à ce titre un socle beaucoup plus rigoureux et plus sûr pour mener à une inférence dès lors que les valeurs inférées deviennent ce faisant estimables quantitativement. En effet, elles deviennent par-là accessibles à des tests de signification quantifiés et rigoureux.

[1] Pour une analyse plus approfondie de l'influence de la théorie des erreurs sur l'approche de Fisher, voir [Giegerenzer, G. *et al*., 1989, 1997], pp. 80-84.

[2] "constructing a hypothetical infinite population", [Fisher, R. A., 1922], p. 311.

[3] Il s'agit bien d'un problème de « spécification » selon Fisher, c'est-à-dire d'un problème de détermination des caractéristiques spécifiques de la « loi mathématique » à laquelle est censée obéir la distribution de fréquence de la population hypothétique infinie. Voir [Fisher, R. A., 1922, pp. 313-314.

[4] "We must confine ourselves to those forms which we know how to handle, or for which any tables which may be necessary have been constructed", [Fisher, R. A., 1922], p. 314.

[5] Aux pages 112-113.

[6] Nous reprenons les notations de [Gigerenzer *et al*, 1989, 1997], p. 112.

des phénomènes biologiques. En conséquence, elle cherche à conserver au maximum cette variabilité dans ses formalisations[1]. Et c'est le « concept contemporain des distributions de fréquence » qui, selon Fisher, incarne mathématiquement la prise en compte par la pensée contemporaine de cette variabilité essentielle[2]. Mais, comme cela a été souvent rappelé[3], le problème spécifique qu'il rencontre à Rothamsted est celui du traitement statistique des petits échantillons. Dans ce dernier cas, il n'est en effet plus possible de négliger l'écart entre une valeur théorique et une valeur estimée. Il lui faut donc suivre le chemin déjà tracé par William S. Gosset (1876-1937, *alias* « Student ») en 1908 et prendre en compte l'erreur probable dans l'estimation des paramètres des courbes de distribution de fréquence, comme dans l'estimation de la moyenne par exemple[4].

C'est là que Fisher, en se distinguant de la perspective de Karl Pearson, adopte une perspective délibérément *informationnelle*[5] sur les mesures effectuées. Comme, à cause de la petitesse des échantillons, il lui est nécessaire de distinguer, d'une part, la population hypothétique des observables et, d'autre part, les observations elles-mêmes, Fisher s'habitue à considérer qu'il faut faire le tri entre ces maigres et disparates données en fonction de leur qualité informationnelle au regard des paramètres estimées. La mathématisation qui en résulte s'éloigne donc d'un degré de ce qui pourrait être sinon vu comme un paramètre naturel représenté mathématiquement. En ce sens, il s'agit d'une *représentation mathématique d'une information glanée sur le vivant mais pas directement d'une représentation mathématique du vivant*. Pour préciser notre interprétation, maintenant que nous avons succinctement rappelé le contexte et la solution technique proposée par Fisher, tâchons de reconstituer l'itinéraire épistémologique qui a pu mener Fisher à de telles considérations.

Esprit étroit et information

La première question spécifique de Fisher est donc la suivante : qu'est-ce que l'on peut apprendre d'une expérimentation à faible nombre d'échantillons ? Cette question recèle en fait deux volets problématiques. Le premier est typiquement celui qui concerne l'expérimentateur : comme faire parler au mieux des données qui sont en faible nombre ? La solution à ce problème sera technique. Ce sera celle de l'ajout artificiel d'un aléa au moyen de ce que l'on appellera un « modèle » hypothétique « statistique » ou « probabiliste ». C'est la solution modéliste que nous avons évoquée. Mais il y a le second volet problématique, celui qui concerne ce que signifie, d'un point de vue cette fois-ci épistémologique, le fait d'apprendre quelque chose au sujet d'un système naturel. C'est là que Fisher décide de nommer *information* ce que l'expérimentateur apprend au

[1] [Fisher, R. A., 1948], p. 218.
[2] "the modern concept of frequency distributions", [Fisher, R. A., 1948], p. 218.
[3] [Desrosières, A., 1993, 2000], p. 353.
[4] Dans l'article célèbre "The probable error of a mean" paru dans *Biometrika* ([Gosset (*alias* 'Student'), W. S., 1908]). Voir l'hommage que lui rend Fisher *in* [Fisher, R. A., 1925, 1946, 1947], pp. 18-19. Dans cet article, Gosset postule dès les premières phrases que « toute expérience doit être regardée comme constituant un individu parmi une population d'expériences qui pourraient être effectuées dans les mêmes conditions » et ainsi qu'une « série d'expériences est un échantillon extrait de cette population » ("Any experiment may be regarded as forming an individual of a 'population' of experiments which might be performed under the same conditions. A series of experiments is a sample drawn from this population", [Gosset (*alias* 'Student'), W. S., 1908], p. 1.
[5] Sur l'importance du rôle de Fisher dans l'émergence de la notion scientifique d'information, nous renvoyons à l'étude fouillée de [Segal, J., 1998], chapitre Ib. Pour notre part, nous ne suivrons pas ici les avatars de cette notion d'information, mais nous essaierons en revanche d'en évaluer le rôle dans l'introduction au cœur de la méthode expérimentale de ce qui deviendra le « modèle statistique ». Dans ses travaux, J. Segal montre que Fisher a d'abord été inspiré par le sens le plus commun du terme *information*, celui de simple renseignement, avant d'en venir à une définition mathématique rigoureuse.

moyen d'expérimentations doublées de l'instrumentation modéliste et statistique censée pour sa part répondre au premier volet problématique. Une telle approche modéliste en biométrie se double donc d'une perspective *informationnelle*. Pour quelle raison ? Et que signifie ici le terme information ?

En fait, Fisher considère qu'« apprendre » quelque chose au sens d'une information, c'est pouvoir faire « entrer » cette chose « en l'esprit »[1]. Pour lui donc, ce qui empêche à la « quantité de données » d'« entrer dans l'esprit », ce n'est pas une incapacité native ou essentielle de l'esprit, ce n'est pas non plus une hétérogénéité totale entre la substance de l'esprit et la substance de ce que l'on veut lui faire assimiler (les données), ce n'est pas enfin une différence de langages (ce qui nécessiterait en ce cas une traduction) entre l'esprit et les données observationnelles, mais ce n'est que le *dimensionnement réduit* de l'esprit, ce n'est que la *quantité* de l'information et non sa *qualité* qui selon lui est à considérer comme rédhibitoire. C'est uniquement parce que l'esprit est *étroit*, qu'il est donc doté d'une faible capacité d'assimilation et de rétention de l'information, qu'il faut le compresseur et l'entonnoir de la statistique pour lui faire assimiler cette *information*. Pour Fisher, il n'y a donc pas de problèmes d'hétérogénéité substantielle ou de traduction linguistique entre esprit et données observationnelles. L'apprentissage du monde observable ne ressortit pas tant de la construction de représentations du monde plus ou moins bien formalisées et d'une nature préalablement adaptée à l'esprit que d'une simple *réduction* de ce qui, par principe et selon l'épistémologie de Fisher, se donne toujours déjà comme une substance tout à la fois informée (dotée d'une forme) et informante (donatrice de forme) donc à même d'entrer telle qu'elle dans l'esprit et d'y former une connaissance. Pour que l'esprit humain soit lui même *in-formé* par la *forme* des données, c'est-à-dire par leur *in-formation*, et qu'il s'assimile donc ces données quasi-identiquement et comme organiquement, il lui faut donc au préalable *simplement les « réduire »*. C'est le sens de la réduction des données au moyen des statistiques :

« Brièvement, et dans sa forme la plus concrète, l'objet des méthodes statistiques est la réduction de données. Une quantité de données qui, en général, de par sa simple masse est incapable d'entrer en l'esprit, doit être remplacée par des quantités en nombre relativement faible et qui doivent représenter adéquatement le tout ou qui, en d'autres termes, doivent contenir le plus possible - idéalement la totalité - de l'information pertinente contenue dans les données originelles. »[2]

Ce qui doit être représenté, c'est le « tout » non pas du phénomène mais de l'information originelle. L'objet de la statistique est donc de fournir une représentation d'information et non la représentation d'un objet ou d'un phénomène naturel. Ce qu'elle vise, c'est une information pertinente sur une information redondante[3]. La représentation statistique construit donc l'information valant sur une information. C'est l'information d'une information. En ce sens, la représentation qui en résulte reste elle-même une information car cet exercice de redoublement de l'information est idempotent[4]. Il n'y a donc pas à *in-former* préalablement nos observations sur le

[1] Voir le passage cité plus bas.

[2] "Briefly, and in its most concrete form, the object of statistical methods is the reduction of data. A quantity of data, which usually by its mere bulk is incapable of entering the mind, is to be replaced by relatively few quantities which shall adequately represent the whole, or which, in other words, shall contain as much as possible, ideally the whole, of the relevant information contained in the original data", [Fisher, R. A., 1922], p. 311.

[3] "Any information given by the sample, which is of use in estimating the values of these parameters, is *relevant information*", [Fisher, R. A., 1922], p. 311. C'est nous qui soulignons.

[4] L'idempotence est cette propriété des applications projectives telle que le fait de les composer à elles-mêmes ne les modifie pas. Si 'o' est le symbole de composition d'une application p, on la formule ainsi : p o p = p.

monde, à leur donner une forme, à les formaliser, puisqu'elles naissent toujours déjà pourvues d'une structure informationnelle. La seule chose qu'il y a à faire consiste éventuellement à traiter l'information en quoi les données consistent toujours déjà pour que cette information convienne à l'esprit, c'est-à-dire pour qu'elle lui soit dimensionnée. L'hypothèse épistémologique de Fisher est donc assez différente de l'hypothèse antiréaliste et positiviste du physicien et philosophe autrichien Ernst Mach (1838-1916) comme du biométricien Karl Pearson. Pour Fisher, il ne s'agit pas de nier qu'il y ait une nature extérieure à l'esprit. Fisher, en ce sens, ne semble pas adhérer à l'ontologie moniste et minimaliste du phénoménisme. Mais il y a cependant tout lieu d'affirmer selon lui que toute observation se meut déjà dans l'élément même de l'informationnel. À ce titre, il n'y a pas à la transposer, à l'in-former ou à la traduire. À strictement parler, la biométrie fishérienne règle donc ainsi radicalement le problème de la formalisation : il n'y a pas de problème de formalisation du vivant puisqu'il n'y a pas d'étape préalable de formalisation. L'approche populationnelle et purement métrique permet donc de faire abstraction de cette question de la représentation ou de la concevoir comme un faux problème ou encore comme un problème épistémologiquement dépassé. C'est en ce sens que Fisher ne théorise pas, à proprement parler, et qu'il reste du côté de l'expérimentation biologique. Mais ce faisant, on peut dire qu'il maintient tout de même une sorte de rapport de représentation puisque qu'il institue un représenté et un représentant, même s'ils se trouvent se mouvoir tous deux à l'intérieur de l'élément information. C'est donc de l'intérieur d'elle-même qu'il travaille l'information acquise par expérimentation. Telle est bien la tâche de la statistique selon, Fisher.

Or, pour travailler de l'intérieur une telle information et lui faire dire tout ce qu'elle peut dire en le moins de mots possibles, ce qui, en cela tout au moins, est bien suivre la conception machienne et pearsonienne de la science entendue comme économie de pensée[1], il faut que les estimations des paramètres de la variabilité biologique (les courbes de fréquences) soient *exactes*. Mais, selon Fisher, ce qui confère cette exactitude est l'approche par *une loi mathématique hypothétique*, c'est-à-dire par ce qu'on appellera plus tard un modèle statistique. Or, à quoi correspond cette exactitude si elle n'est pas l'exactitude d'une correspondance entre la représentation d'une réalité et cette réalité elle-même ? Qu'est-elle si elle ne peut prendre sens que dans le rapport d'une structure informationnelle à une autre structure informationnelle censée se substituer à une réalité naturelle hypothétique ? C'est là qu'intervient le rôle d'un infini que l'on pourrait qualifier d'« hypothétique » pour le distinguer du concept classique d'infini potentiel qui ne répond pas tout à fait au même problème.

Le rôle d'un infini hypothétique dans le modèle statistique

Pour répondre à la question de ce que signifie l'exactitude dans une conception informationnelle de l'expérimentation, il faut en effet remarquer que l'importante introduction de

[1] Voir [Mach, E., 1883, 1904, 1987], p. 3 : « J'ai déjà exposé mon opinion sur la nature de toute science, qui est de la considérer comme une économie de pensée » ; p. 12 : « L'économie dans la communication et la conception appartiennent à l'essence de la science » ; p. 450 : « Lorsque nous faisons dans la pensée une copie d'un phénomène, jamais celle-ci n'est faite d'après le fait *global* mais bien d'après celui de ses côtés qui nous a semblé *important*. Dans cette opération, nous avons un but qui est le produit indirect ou immédiat d'un intérêt pratique. Nos copies sont toujours des abstractions et, ici encore, l'on peut constater cette même tendance à l'économie », c'est l'auteur qui souligne. Sur l'ontologie antiréaliste de Mach, voir *ibid.*, pp. 450-451 : « Il n'y a dans la nature aucune chose invariable. Une chose est une abstraction […] Les sensations ne sont pas des 'symboles de choses'. La 'chose' est au contraire un symbole mental pour un complexe de sensations d'une stabilité relative […] [Les sensations] sont les véritables éléments du monde. »

l'infinité aux yeux de Fisher[1] est une conséquence directe de sa conception fréquentiste de la probabilité. Puisque la probabilité n'est conçue, selon cette perspective, que comme la limite de la fréquence d'un événement, pour s'autoriser à en manipuler le concept exact, il faut *supposer* qu'il recèle toujours en lui un infini : le passage à la limite. L'exactitude de la loi de probabilité estimée, donc l'exactitude de notre *information* sur la variabilité biologique, suppose que l'on n'oublie pas que subsiste toujours ce support hypothétiquement infini de la probabilité. Donc c'est bien d'abord par la notion d'infinité, commandée elle-même par une conception fréquentiste de la probabilité, que Fisher fait pour la première fois entrer de l'*hypothétique* dans son travail sur l'informationnel[2]. Car l'exactitude exige l'hypothétique passage à l'infini de l'évaluation d'une fréquence. Cette nécessaire première infinité autorise la manipulation exacte de la probabilité. Or c'est dans ce choix raisonné pour l'*hypothétique,* c'est-à-dire pour une sorte de *fiction bien fondée*, que l'on peut voir une des sources du déracinement des formalismes en biométrie.

Mais le concept de probabilité seul ne suffit pourtant pas à définir une courbe de fréquence *continue*. Les calculs d'évaluation des estimations au moyen des tests de signification (le 't' de Student par exemple) montrent que ce sont des statistiques à distributions *continues* qui conduisent à une *exactitude* dans l'estimation[3]. Si l'on veut faire tendre l'histogramme vers une réelle courbe continue de distributions de fréquences où chaque fréquence est représentée par une classe d'échantillons, alors il faudra là aussi considérer que cette courbe de fréquence est la limite d'un histogramme de probabilités où les intervalles sont de plus en plus petits mais où le nombre d'échantillons par probabilité tend lui aussi vers l'infini afin que chaque élément différentiel de probabilité (dp) soit évaluable. Chaque dp exige donc une double infinité : en tant que *probabilité* d'une part, et d'autre part, en tant qu'élément évanouissant d'une courbe *continue* de distributions de fréquences exactes (ou de distributions de probabilités). C'est introduire là ce que Fisher appelle la « seconde infinité »[4]. Or, c'est cette seconde infinité qui va définitivement déplacer le caractère hypothétique porté auparavant par le seul concept fréquentiste de probabilité vers un construit mathématique appelé « loi mathématique » hypothétique[5]. Ce déplacement de l'*hypothétique d'un concept* vers l'*hypothèse d'un construit* qui, à son tour, va ensuite servir de substitut à la nature dans l'analyse de son aspect informationnelle, se perçoit très bien dans l'expression alors adoptée par Fisher de « population hypothétique infinie ». Dans le passage décisif de l'article de 1922 que nous évoquons ici et qui prépare l'avènement du modèle statistique, c'est la population des faits potentiellement observables qui, imperceptiblement, finit par hériter du qualificatif d'« hypothétique ». Dans le concept de « population hypothétique infinie » avec lequel la justification fishérienne s'achève, les deux éléments hypothétiques des deux infinités sont l'un et l'autre pris en compte et situés en une fiction commune qui sert de fondement pour une exactitude dans l'estimation. Le caractère hypothétique, venu de l'interprétation fréquentiste de la probabilité, contamine donc au final le construit mathématique. Ce dernier en hérite pour devenir ce que l'on appellera un « modèle statistique ».

C'est donc pour une raison rigoureuse, interne au raisonnement anti-bayésien de Fisher, que le concept de modèle est introduit en biométrie comme une loi mathématique à concevoir de

---

[1] Presque toute une page lui est consacrée dans [Fisher, R. A., 1922], p. 312.

[2] Cela se confirme même explicitement dans un passage de l'article plus tardif de 1925 "*Theory of Mathematical Estimation*" : "Being infinite the population is clearly hypothetical […] Briefly the hypothetical population is the conceptual resultant of the conditions which we are studying", [Fisher, R. A., 1925], p. 700.

[3] Voir l'introduction de [Fisher, R. A., 1930] remontant à 1950 et publiée dans *Contribution to Mathematical Statistics*, New York, John Wiley & Sons, 1950, 22, p. 527a : "It is emphasized that statements of equality (exact statements) of fiducial probability can only be derived from statistics having continuous distributions."

[4] "In frequency curves, however, a second infinity is introduced", [Fisher, R. A., 1922], p. 312.

[5] [Fisher, R. A., 1922], p. 312.

manière *hypothétique*. Pourtant cette introduction n'est pas principalement due au fait que Fisher aurait par-là totalement adhéré au phénoménisme et à l'ontologie antiréaliste de Mach ou de Pearson. La « population hypothétique et infinie » de Fisher n'est pas simplement une sorte de « symbole mental » au sens où l'entend Mach, c'est-à-dire au sens d'un opérateur abstractif et économique pour la pensée et tendant à rassembler en un pur être de raison un ensemble de propriétés sensitives immédiates.

Le causalisme faible de Fisher

On pourrait croire en effet que ce modélisme fishérien ne fait que développer l'antiréalisme que Pearson avait auparavant prôné dans *La grammaire de la science*. Il est en fait de nombreux passages qui montrent que Fisher conserve toujours cette foi causaliste que Pearson avait pour sa part fermement rejetée à la suite de Mach[1]. Rappelons en effet que, dans son ouvrage de 1892, Pearson s'était appuyé sur les analyses antimétaphysiques de Mach pour définir la causalité comme une abstraction valant seulement pour désigner commodément et synthétiquement[2] les rapports mutuels entre les « copies mentales des faits »[3]. Or, pour Mach et Pearson, ces dernières sont elles-mêmes de la nature d'une abstraction. Elles sont donc construites fictivement par l'esprit humain à partir des seuls éléments réels du monde qui lui soient accessibles : les sensations. Mach avait ainsi remplacé le concept de « cause » par celui de « fonction »[4]. Dans sa réédition de 1911, Pearson, de son côté, fort des derniers développements sur la corrélation statistique, renforce encore l'argument en défaveur de la réalité de la cause, mais cette fois-ci, non seulement en niant, comme Mach, le fait qu'elle corresponde à « quelque réalité existant derrière les phénomènes »[5] mais aussi en affaiblissant (ce qui est nouveau par rapport à l'argument de Mach) la nature de la dépendance entre « cause » et « effet » au moyen du concept de corrélation. Pearson écrit : « Ce concept de corrélation entre deux événements embrasse toute relation, depuis l'indépendance absolue jusqu'à la dépendance complète. Il forme la catégorie la plus vaste par laquelle nous avons à remplacer la vieille idée de causation. »[6] Autrement dit, chez Pearson, la causation est ébranlée tant du côté de son enracinement dans les choses que du côté de sa nécessité supposée, tant dans son lien à la réalité que dans la fermeté de ce lien de dépendance qu'elle établit entre les phénomènes.

Or, de son côté, Fisher ne suit pas Pearson sur cette pente, même s'il conçoit les causes de façon indéterministe[7]. Ainsi, il ne craint pas de recourir aux notions de cause et d'effet,

---

[1] Pour une analyse suggestive de ce texte de Pearson à la lumière de l'épistémologie de Mach, voir [Desrosières, A., 1993, 2000], pp. 132-140.

[2] Dans la préface à la seconde édition de son livre (1899), on lit : "Step by step, men of science are coming to recognize that mechanism is not at the bottom of phenomena, but is only the conceptual shorthand by aid of which they can briefly describe and resume phenomena", [Pearson, K., 1892, 1937, 1949], p. 5.

[3] [Mach, E., 1883, 1904, 1987], p. 451.

[4] [Mach, E., 1883, 1904, 1987], p. 2.

[5] Voir l'extrait du chapitre 5 intitulé « Contingence et Corrélation » de *La grammaire de la science* cité par [Desrosières, A., 1993, 2000], p. 135. L'auteur cite la traduction française de Lucien March parue en 1912. Elle inclut encore le chapitre 5 que Pearson retirera par la suite notamment du fait des progrès en statistiques. On en peut encore lire un résumé *in* [Pearson, K, 1892, 1937, 1949], p. 349.

[6] Voir l'extrait du chapitre 5 de *La grammaire de la science* cité par [Desrosières, A., 1993, 2000], p. 138.

[7] Fisher a ensuite théorisé son propre indéterminisme dans plusieurs articles à tonalité philosophique. Voir [Fisher, R. A., 1934] et [Fisher, R. A., 1950]. Dans l'article de 1934, il se livre ainsi à une analogie entre la théorie de la sélection naturelle et la seconde loi de la thermodynamique en insistant sur le fait que l'une et l'autre présentent des causations indéterministes au niveau microscopique tandis qu'à l'échelle supérieure elles dessinent l'une comme l'autre un destin parfaitement déterminé. Le « principe d'indéterminisme » de la physique quantique lui paraît également suggérer une telle analogie. C'est ce qui amène Fisher à considérer que le fait de se représenter un monde gouverné par des causes indéterministes, comme il se le figure en effet, ne consiste pas du tout à renoncer au déterminisme mais à en faire un

notamment dans son travail d'analyse des expérimentations agronomiques, mais aussi quand il s'agit de justifier le fait que des mesures indépendantes peuvent être considérées comme assimilables à un échantillon aléatoire tiré dans une population infinie :

« On doit noter qu'il n'y a pas de fausseté dans le fait d'interpréter tout ensemble de mesures comme un échantillon aléatoire d'une population infinie ; parce que tout ensemble de nombres de ce type est un échantillon aléatoire de la totalité des nombres produits par la même matrice de conditions causales : la population hypothétique que nous étudions est un aspect de la totalité des effets de ces conditions, de quelque nature qu'elles soient. »[1]

Dans ce passage difficile, Fisher veut répondre à l'objection suivante : le fait de substituer systématiquement au phénomène total mesuré un modèle équivalent, qui prend de surcroît toujours la forme mathématique d'une population statistique infinie de faits observables, semble porteur de fausseté dans la mesure où cette hypothèse paraît *a priori* lourde et réductrice voire trompeuse quant à la *nature* effective du phénomène. Ce que nous pouvons déjà dire, c'est que, du fait qu'il s'attache à y répondre, Fisher reçoit cette objection. C'est-à-dire qu'il lui trouve un sens. Cela montre déjà assez qu'il choisit de ne pas négliger totalement le problème de la *nature* de la cause effective, au contraire de Pearson.

La réponse de Fisher à cette objection consiste ensuite à arguer du fait que la population hypothétique infinie peut toujours être considérée comme rendant compte fidèlement et intégralement d'un seul aspect, il est vrai, de la *structure causale* du phénomène. Pour montrer que l'information directement prélevée par expérimentation (les mesures) et l'information construite par le modèle statistique peuvent être réduites l'une à l'autre et directement comparées sans introduire par-là une « fausseté », Fisher s'attache à montrer que la population hypothétique infinie nous est transparente du point de vue des conditions causales qui sont à l'origine des effets observables. Mais afin de rendre claire dans son argument l'innocuité de l'introduction du modèle

---

cas particulier d'ordonnancement statistique des causations indéterministes : Fisher propose donc un élargissement du concept de causalité en faveur de l'indéterminisme. De plus, de telles analogies qui traversent si bien le domaine de la microphysique, de la cinétique des gaz, de la thermodynamique comme de la biologie ont, selon lui, la vertu d'« unifier le concept de loi de la nature » ([Fisher, R. A., 1934], p. 99), concept auquel Fisher tient particulièrement puisqu'il y reviendra également 16 ans plus tard dans l'article de 1950. Mais, dans cet article plus tardif, une tonalité religieuse vient s'ajouter au propos puisqu'il s'agit de montrer le « pouvoir créatif » de la « causation indéterministe » y compris dans ses résultantes globalement déterministes. Ainsi Fisher montre que Bergson a tort d'imposer une fausse alternative au biologiste en lui ordonnant de choisir entre un mécanisme ou un vitalisme car Bergson ne sait pas que c'est l'indéterminisme qui gouverne l'univers à la fois physique et biologique ; ce qui est une donnée scientifique nouvelle à quoi la philosophie doit se plier. Or, si l'on accepte cet état de fait, on n'a plus besoin de recourir à la « magie » de l'élan vital. Et la sélection naturelle peut être néanmoins présentée comme un processus *à la fois créatif et déterminé*. La touche finale religieuse est alors la suivante : toutes ces théories des élans vitaux, des tendances individuelles modelant le monde, ces théories des hérédités des caractères qui sont acquis à force d'adaptation et de volonté des individus (lamarckisme) font fi du jeu universel de la sélection naturelle au niveau des réelles performances. Elles postulent faussement qu'il ne se joue qu'au niveau des seules tendances ou des élans seulement virtuels. Elles sont ainsi comparables à une théologie chrétienne qui, de façon déséquilibrée, ne privilégierait que la tension spirituelle de la *foi*, sensible au cœur, en oubliant le rôle du *travail* du corps de l'homme dans le monde (dialectique classique de la foi et des œuvres) : de même que la *foi* ne suffit pas à réaliser les desseins de Dieu sans les secours, il est vrai d'abord cachés dans leur efficace à nous comme aux autres, de nos propres *œuvres*, de même toutes les tendances, tous les élans vitaux, toutes les tensions adaptatives ou mutationnelles (critique au passage de la théorie qui surestime le rôle des mutations génétiques) interviennent certes dans l'« évolution créatrice » mais restent de très peu de poids par rapport à la masse des interactions statistiques entre les performances réelles des individus dans la vaste écologie du monde. Voir [Fisher, R. A., 1950], pp. 9-11 et 17-20.

[1] "It should be noted that there is no falsehood in interpreting any set of independent measurements as a random sample from an infinite population ; for any such set of numbers are a random sample from the totality of numbers produced by the same matrix of causal conditions : the hypothetical population which we are studying is an aspect of the totality of the effects of these conditions, of whatever nature they may be", [Fisher, R., 1922], p. 313.

de population infinie, il est obligé de faire intervenir un *troisième terme* entre mesures et modèle : c'est cela qu'il nomme la « matrice des conditions causales ». Le modèle populationnel est une partie totale d'un aspect de la matrice des causes. C'est-à-dire qu'il *épuise a priori* ce que l'on peut apprendre du phénomène vu sous cet aspect précis. Il est l'hypothèse d'une information totale sur le phénomène selon cet angle de vue précis. Donc, si l'expérimentation elle-même prend garde de n'interroger le phénomène que sous ce même angle de vue, on pourra aussi bien dire que les mesures proviennent de la « matrice des conditions causales » effective (du phénomène mesuré) que du modèle qui a capté totalement cette seule matrice sous ce seul aspect. Donc, dans les calculs d'inférence statistique, on peut substituer le modèle à la réalité causale effective parce qu'il en *est* identiquement la matrice causale selon le point de vue que l'on s'est fixé.

Ainsi, à ses propres yeux, Fisher ne semble pouvoir justifier définitivement l'introduction du modèle hypothétique que parce qu'il peut encore s'appuyer sur une théorie du troisième terme (qui ne vaut cependant qu'en tant qu'il existe et sert ainsi de point d'ancrage minimal à la fois pour les mesures et pour le modèle mais non point parce qu'on en peut saisir la nature intrinsèque) et sur une théorie minimale de la correspondance entre une information et une réalité : cette correspondance est en effet fantomatique en ce qu'elle est strictement perspectiviste (avec la restriction du point de vue ou de l'« aspect ») et elle ne réfère pas à des causes réputées réellement définissables en elles-mêmes mais simplement à une « *matrice* de conditions causales », qui plus est, probabiliste, c'est-à-dire indéterministe. Autrement dit, cette réalité faible qui joue le rôle d'un point d'ancrage minimal nécessaire à la légitimation définitive de l'introduction d'un modèle n'est définie que par ce qu'elle occasionne dans ses effets. Donc le modèle devrait pouvoir valoir « quelle que soit la nature » des « conditions causales », c'est-à-dire quelle que soit la nature du phénomène. Là est une des significations épistémiques majeures de ce nouveau type de mathématisation.

Pour finir sur ce point, remarquons qu'une telle interprétation du modèle mathématique n'exige finalement qu'une seule chose du phénomène : qu'il ait une identité, qu'il ait une nature (indéterministe) stable qui puisse justifier sa substitution par un modèle calqué sur l'hypothétique matrice de conditions causales. Il faut que ce phénomène ait cette constance minimale en quoi consiste précisément une nature. Il faut qu'il soit identifiable au sens où il doit être au moins identique à lui-même, tout au moins du point de vue de sa matrice causale totale et par-delà la variabilité à laquelle cette même matrice peut prêter, dans ses effets, et qu'elle détermine fondamentalement. En ce sens, il nous est possible de comprendre que Fisher ne récuse pas totalement l'idée de causalité puisque c'est la supposition d'une structure causale commune entre le modèle et la réalité qui selon lui autorise que l'on substitue l'un à l'autre dans les tests de signification. Son modélisme ne peut donc totalement adhérer à un antiréalisme et un anticausalisme radical comme celui de Pearson. En ce sens, nous souscrivons pleinement à l'interprétation du statisticien et historien des sciences Alain Desrosières lorsqu'il écrit qu'à la différence de Karl Pearson, « le test [de signification] de Fisher est inscrit dans une visée de vérité et de science : une hypothèse théorique est jugée plausible, ou elle est rejetée, compte tenu des données observées »[1]. Fisher ne renonce pas en effet totalement à l'idée de la vérité-correspondance même si elle devient avec lui une idée doublement régulatrice et non constitutive : d'une part en ce que tout modèle ne donne *qu'un aspect* de la nature du phénomène (perspectivisme), d'autre part en ce qu'il n'est pas possible de préciser davantage (même en esprit) la nature du phénomène autrement que par la postulation hypothétique d'une « matrice

[1] [Desrosières, A., 1993, 2000], p. 353.

causale » sur laquelle on ne fait que prélever des informations. Les deux termes de la correspondance qui se font face dans une telle théorie de la vérité-correspondance ont donc certes une existence chez Fisher mais une existence faible, hypothétique, plus précisément : une existence purement informationnelle du côté du savoir, et purement matricielle indéterministe du côté de la réalité sue.

La modélisation de la croissance des plantes selon Fisher

Dès lors, comment Fisher applique-t-il en particulier sa technique statistique aux problèmes de la croissance des plantes ? Pour répondre à cette question, il faut préalablement garder en l'esprit le fait que sa perspective de biologie mathématique appliquée vise avant tout la découverte des « causes » et la quantification de leurs poids relatifs dans la croissance végétale. De plus, comme son contexte de travail est agronomique, ses objets biologiques sont surtout des plantes herbacées. La valeur résultante mesurée pour évaluer leur croissance se réduit, pour le blé par exemple, à un simple décompte du nombre de boisseaux par récolte et par hectare[1]. N'est donc pris en compte, comme résultat de la croissance de la plante, que ce qui intéresse *a priori* la production agricole : ici, le grain de blé. La représentation de la plante en tant que telle ne présente pas d'intérêt pour lui. L'approche informationnelle se confirme ici en ce que l'expérimentateur ne mesure dans le phénomène global que ce qui l'intéresse, et cela toujours en vue d'une action précise, anticipée, c'est-à-dire dont les effets sont déjà grossièrement prévus et/ou souhaités : par exemple, l'épandage d'engrais pour accroître la production.

Moyennant cette quantification très limitée, pragmatiquement orientée, de la croissance, et toujours dans le cas du blé, Fisher classe d'abord en trois grandes catégories ces différentes « causes de variation dans la production de blé »[2] qui se trouvent être indépendantes de l'épandage d'engrais : 1) la variation annuelle due principalement au temps qu'il a fait dans l'année, 2) la détérioration du sol et 3) les changements lents. Ce sont ces derniers changements auxquels Fisher, à la fin des années 1910, ne sait pas encore assigner de causes mais au sujet desquels il veut justement tester plusieurs hypothèses causales. La résolution de ce problème est un des objets principaux de sa série d'articles sur la variation de la production de blé qui paraîtront à partir de 1921. Fisher y applique une technique d'analyse de variance au moyen de laquelle il évalue les contributions de chaque facteur dans la variation de croissance du blé[3]. Cela lui permet de montrer le rôle *vraisemblable* (au sens rigoureux de mot « vraisemblance » ["*likelihood*"] qu'il introduit à l'époque) que joue l'envahissement lent mais progressif des semis par les mauvaises herbes.

L'analyse ou réduction de la variance

La technique des plans d'expérience telle qu'elle a été développée par Fisher à partir des premiers travaux de W. S. Gosset est souvent présentée comme synonyme de la technique d'« analyse de la variance » alors que Fisher met cette dernière au point plutôt dans un contexte

[1] Voir [Fisher, R. A., 1921a], p. 110.
[2] "The causes of variation in wheat yields", [Fisher, R. A., 1921a], p. 109.
[3] [Fisher, R. A., 1921a], p. 111.

de génétique des populations, aux alentours de 1918. En fait, cette technique peut être considérée comme référant ensuite spécifiquement à la partie d'analyse statistique des plans d'expérience.

Pour la mettre en œuvre[1], à partir des mesures et par la méthode des moindres carrées, on procède d'abord à une estimation des paramètres de la population infinie. Ensuite, on évalue les différences ou *résidus* entre les résultats observés et les résultats estimés. La variance de ces résidus s'appelle variance de l'erreur ou *variance résiduelle*. La technique d'analyse ou de réduction de cette variance repose tout entière sur le principe que les variances *s'ajoutent* lorsque les effets des différents traitements ou facteurs opérant sur la plante sont indépendants. Dans ce dernier cas, on montre que « la somme des carrés des résultats observés est égale à la somme des carrés des résultats ajustés augmentée de la somme des carrés des résidus »[2]. Autrement dit, il apparaît que l'on peut complètement séparer l'erreur résiduelle des autres contributions à la variance et ainsi directement travailler à la *réduire*. De façon plus générale, lorsque l'on a plusieurs paramètres indépendants à estimer, on peut montrer que la somme des carrés des résultats observés est égale à la somme des différentes sommes des carrés des résultats ajustés à chacun des paramètres. On peut donc séparer les contributions de ces différents paramètres dans la variance globale et l'on parle alors plus généralement de *décomposition* ou d'*analyse* de la variance.

On voit donc que le travail de Fisher consiste principalement à démêler les causes qui paraissent sinon enchevêtrées dans les phénomènes de croissance biologique que l'on mesure. Un des objectifs plus large du travail de Fisher est en fait de donner à terme la possibilité aux agronomes de prédire la production en blé en fonction des relevées météorologiques. Mais encore faut-il pour cela avoir extrait les causalités parasites qui interfèrent avec le facteur climatique : c'est bien justement le sens de tout son travail statistique.

On peut une fois de plus faire remarquer ici que puisque l'objectif est seulement d'y démêler des causes et non pas d'en représenter le processus, la nature précise de la plupart des causes n'est pas assignée : seules celles qui intéressent l'agronome sont précisément qualifiées. Ainsi, avec l'outil statistique, il est également possible de regrouper un grand nombre de causes relativement hétérogènes sous une même loi de variation pour peu que ces variations, prises en bloc, soient en fait globalement indépendantes de celles qui intéressent l'expérimentateur[3]. La « cause », on le voit, n'est donc pas traitée comme une entité réelle, en soi, et qu'il faudrait découvrir ou dévoiler. Comme les mots qui figurent dans une information à support syntaxique purement structural, la cause est *délimitée* dans ses contours mais elle n'est *pas définie* en sa nature. De même que pour le signe linguistique au sens de Ferdinand de Saussure, sa définition est *informationnelle* au sens où elle est essentiellement *différentielle* : elle est de n'être pas une autre. On comprend dès lors que le seul travail que l'on puisse effectuer sur de telles causes ne soit que de la nature d'une *discrimination*. Ainsi, pour Fisher, la cause est bien une simple « matrice causale » puisque elle est simplement aperçue et réalisée au travers de la grille informationnelle que donnent les mesures du plan d'expérimentation. L'importance d'une cause dans un processus peut certes être inférée à partir des mesures, mais seulement à la condition que l'expérimentateur ait au préalable, d'une part, déjà prévu et qualitativement discriminé cette cause dans son discours au moment de la préconception du plan d'expérience et, d'autre part, que

[1] Pour ce rappel, nous nous sommes aidé de la présentation didactique de [Vessereau, A., 1947, 1960, 1988], pp. 174-175.
[2] [Vessereau, A., 1947, 1960, 1988], p. 176.
[3] Voir notre encadré.

sa contribution se révèle quantitativement forte après analyse de la variance, comme c'est en effet le cas des mauvaises herbes dans la production de blé.

Précision de l'indéterminisme : critique des premières formules mathématiques générales (1921)

Un autre aspect des travaux de Fisher intéresse là aussi directement notre historique de la modélisation des plantes. Il s'agit de celui dans lequel Fisher manifeste une très grande réserve à l'égard des premières « analyses quantitatives de la croissance des plantes » qui mettent en œuvre ce qu'il appelle des « formules mathématiques générales »[1]. En effet, en 1921, au moment même où il publie ses articles fondateurs autour de la méthode des plans d'expérience, il trouve par ailleurs l'occasion de se livrer à une vive critique des travaux des physiologistes des plantes que sont G. E. Briggs, C. West et F. Kidd. En 1920, ces derniers avaient introduit une méthode pour calculer ce qu'ils appelaient le Taux de Croissance Relative (TCR)[2] de la plante. Ce concept avait lui-même été proposé auparavant, en 1919, par le botaniste britannique Vernon Herbert Blackman (1872-1967) dans un article des *Annals of Botany*[3]. Blackman avait en effet remarqué que l'on pouvait approximativement exprimer les valeurs successives de la masse d'une plante de la même manière que l'on exprime l'accroissement d'une masse monétaire par la loi dite des « intérêts composés »[4]. Il avait été le premier à proposer une formulation mathématique aussi synthétique pour la croissance de la plante. Briggs, West et Kidd réagirent alors très vite et, l'année suivante, ils proposèrent une méthode pour mener au calcul effectif de cette valeur à partir de « données qui avaient été laissées en sommeil dans la littérature depuis quarante années »[5]. Dans son article de 1921, Fisher rappelle d'abord comment les auteurs définissent ce taux de croissance relative R[6]. Si m est la masse de la plante à l'instant t, et m_0 sa masse initiale, R intervient de la façon suivante :

$$m = m_0 e^{Rt} \qquad (1)$$

Ainsi, si l'on prend deux mesures successives 1 et 2 de la masse de la plante, on a :

$$R = \frac{\log m_2 - \log m_1}{t_2 - t_1} \qquad (2)$$

De plus, Fisher constate que l'on peut aussi écrire R à chaque instant en dérivant l'expression (1) :

$$R = \frac{1}{m} \times \frac{dm}{dt} = \frac{d}{dt} \log m \qquad (3)$$

[1] "general mathematical formulae", [Fisher, R. A., 1921b], p. 372.
[2] "Relative Growth Rate", [Fisher, R. A., 1921b], p. 367.
[3] [Fisher, R. A., 1921b], p. 372.
[4] [Fisher, R. A., 1921b], pp. 367 et 372.
[5] "to apply these methods to data which have been lying dormant in the literature for forty years", *in* Briggs, G. E., Kidd, F. et West, C., 1920, "A quantitative analysis of plant growth. Part I.", *Annals of Applied Biology*, VII, 103 ; extrait cité par [Fisher, R. A., 1921b], p. 367 et référence donnée par Fisher : *ibid.*, p. 372.
[6] [Fisher, R. A., 1921b], pp. 368.

En fait, Fisher fait remarquer ce point important : bien que l'expression (2) donne la *valeur moyenne* de R sur une période de temps entre deux observations, l'expression (3) donne la *valeur précise* de R à chaque instant. Il semble donc *a priori* nécessaire de préciser quelle approche sera favorisée dans l'évaluation de R à partir des mesures.

Afin de régler ce problème d'interprétation liminaire, Fisher cite ensuite un large extrait de l'article de Briggs, West et Kidd dans lequel ces derniers expriment en substance quatre idées successives : 1) Tout d'abord, pour justifier leur recours à une telle formule, ils souscrivent au raisonnement *analogique* de Blackman (1919) : une telle formulation semble être *a priori* la plus naturelle dans la mesure où, comme dans de nombreuses réactions chimiques et biologiques, elle ne fait qu'exprimer le taux d'une croissance par la quantité de changement par unité de matériau et par unité de temps (d'où l'adjectif « relatif » dans « taux de croissance relatif » qui convient bien aux auteurs comme à Fisher lui-même). 2) Dans la plante cependant, le taux de changement n'est pas constant : il change lui-même constamment. 3) En conséquence, il faudrait dans l'idéal évaluer R en espaçant les mesures d'une période infiniment courte. 4) Mais, comme cela n'est bien sûr matériellement pas possible pour l'expérimentateur, il faut se replier sur une approche que les auteurs qualifient de « purement conventionnelle »[1] :

« Il doit être remarqué que la méthode ne prétend pas à la précision mathématique, n'étant qu'une simple approximation de la moyenne sur la semaine, mais avec les résultats qui sont disponibles à l'heure actuelle, rien de plus précis ne peut être obtenu. »[2]

Fisher souligne alors le contraste qui selon lui apparaît entre la précision de la première définition du taux de croissance relative et « le caractère arbitraire et inconséquent de la méthode qui est proposée pour le calculer »[3]. La formule précise (3) découle de l'évocation de l'idée numéro 1 des auteurs, tandis que c'est la formule grossière (2) qui semble devoir s'imposer devant les suggestions d'apparence modestes et réalistes de l'idée numéro 4.

Il y a donc selon Fisher une *contradiction inhérente* aux projets de ces physiologistes amateurs de formules générales. La formule générale peut être exacte si on la considère à l'échelle de l'instant et c'est d'ailleurs parce qu'elle possède cette qualité qu'on en justifie l'introduction. Mais quand il s'agit de lui faire rencontrer les mesures, elle devient semble-t-il lâche et très peu rigoureuse. Et l'argument qui vient alors est celui de l'approximation assumée. Mais il y a là quelque chose d'incohérent : comment peut-on, dans un premier temps, légitimer l'introduction d'une expression mathématique au nom de sa précision et, dans un deuxième temps, faire justement fi de cette précision pour la rendre applicable ? En renonçant à l'usage précis qu'on en peut faire ne détruit-on pas en même temps la légitimité qu'on avait voulu lui accorder et n'abandonne-t-on pas dès lors sa formulation au pur arbitraire ?

En fait, tel n'est pas *a posteriori* le cas puisqu'il se trouve que la formule (2) peut être employée sur n'importe quel laps de temps[4]. Mais Fisher voit déjà une autre difficulté dans cette

---

[1] "purely conventional method", [Fisher, R. A., 1921b], p. 368.

[2] "It must be noticed that the method does not pretend to mathematical accuracy, being merely an approximate average for the week, but with such results as are at present available nothing more accurate can be obtained", *in* Briggs, G. E., Kidd, F. et West, C., 1920, "A quantitative analysis of plant growth. Part I.", *Annals of Applied Biology*, VII, 103 ; extrait cité par [Fisher, R. A., 1921b], p. 368 et référence donnée par Fisher : *ibid.*, p. 372.

[3] "the inconsequent arbitrariness of the method proposed for its calculation", [Fisher, R. A., 1921b], p. 368.

[4] [Fisher, R. A., 1921b], p. 371. Plus bas, nous verrons que Teissier critiquera lui aussi certaines de ces formules générales analogiques. mais pour d'autres motifs. Cette différence ne sera pas pour rien dans les divergences qui se feront jour entre l'épistémologie anglo-saxonne des modèles probabilistes et celle qui se développera plus tard, en France.

proposition. Les auteurs ont certes eu raison de rappeler le fait que recourir à la formule exacte imposerait de se donner des laps de temps infiniment courts. Mais ils n'ont vu là qu'une seule infinité au lieu des trois qu'il devrait être nécessaire, en théorie, de maîtriser, selon Fisher, pour qu'une telle formule soit correctement employée : la période de temps infinitésimale, mais aussi *la précision infinie* et *le nombre infini d'échantillons*[1]. En fait, au vu de cet idéal infinitiste (qui, rappelons-le, est pour sa part assumé dans la méthode de Fisher puisqu'il est projeté dans le modèle, c'est-à-dire dans l'« hypothétique population *infinie* »[2]) et au vu des données qu'utilisent les auteurs en plus du relevé des masses végétales (les moyennes hebdomadaires des températures et le nombre d'heures journalières d'ensoleillement), ce n'est même pas d'imprécision qu'il faudrait parler selon Fisher puisqu'on aboutit à des erreurs de 100% ou plus ! Comme toutes les autres données sont aussi mal suivies que la masse, il y a donc selon Fisher quelque tromperie à faire croire que le passage à la méthode approximative ne serait dû qu'à l'impossibilité pratique d'appliquer la formule de R à chaque instant.

À le lire de près, on comprend donc que, selon Fisher, il faut prendre conscience de la variabilité de *toutes* les données mesurées pour prendre réellement la mesure des approximations qu'impose l'application d'une « formule mathématique générale ». Or c'est précisément cette variabilité dont les physiologistes n'ont pas bien pris conscience, semble-t-il[3].

Fisher propose alors un certain nombre de corrections ponctuelles, notamment celle qui consiste à considérer que le passage de l'intérêt composé à l'intérêt simple exige que l'on prenne plutôt la masse médiane (c'est-à-dire ½ (m_1 + m_2)) au lieu de la masse initiale de la période de temps considérée si l'on veut une meilleure évaluation de R. Sans rentrer davantage dans le détail de ces suggestions qui semblent n'être pour lui qu'autant de pis-aller tant la méthode générale des « formules mathématiques » lui paraît contestable sur le principe (même s'il ne le conteste pas frontalement puisque l'approche antérieure de Blackman lui paraît tout de même légitime sur le plan pragmatique), remarquons que Fisher conclut cet article très critique sur les deux idées que l'on doit selon lui en retenir : parce que leur méthode de calcul conduit à exagérer l'accroissement en masse quand la plante croît et parce qu'ils appliquent en même temps une même formule à des laps de temps de longueurs inégales et rendent ainsi leur approche inconsistante, Briggs, Kidd et West proposent une méthode excessivement imprécise alors même qu'elle prétend représenter approximativement (à l'aide d'une approximation qui se veut contrôlée) l'« histoire de la croissance des plantes annuelles »[4] au moyen de « formules mathématiques générales ». C'est cette prétention de fournir une représentation approximative de la plante que Fisher critique.

Le bilan que l'on peut tirer de cette analyse est que Fisher ne conteste pas ouvertement l'approche par les « formules mathématiques générales » en biologie et spécifiquement en physiologie. Mais il tire profit d'une approche ponctuellement mal maîtrisée en ce domaine pour faire ressortir, d'une part, que si l'on veut manipuler correctement la notion d'approximation, il faut la référer à celle d'*infinité* (de la précision, de la fréquence des mesures et enfin du nombre d'échantillons de mesure) et à l'idéal d'information qu'elle désigne au sujet d'un phénomène,

---

[1] [Fisher, R. A., 1921b], p. 369.

[2] Qui permet en retour l'exactitude ou tout au moins le contrôle de la vraisemblance des paramètres mathématiques du modèle statistique à la Fisher.

[3] C'est là faire écho à une divergence de vue classique entre biométricien et physiologiste. Voir [Schreider, E., 1967], p. 110 : « Et pourtant, lorsque le biométricien affirme que les relations entre les éléments d'un ensemble ne sont pas fonctionnelles, que les rapports de probabilité dominent la physiologie, il répète, avec des preuves plus précises, une vérité connue depuis fort longtemps ». Et Schreider de citer à la suite un passage d'Etienne-Jules Marey (1830-1904) : « Une loi n'est que la détermination des rapports numériques entre différents phénomènes ; il n'y a donc pas de loi physiologique parfaite », extrait de *La machine animale*, Paris, 1873.

[4] "growth history of annual plants", [Fisher, R. A., 1921b], p. 372.

d'autre part, que la physiologie qui veut se mathématiser doit avant tout prendre conscience de l'importance de la *variabilité* dans tout système biologique. Et l'on a déjà suffisamment vu combien ces deux concepts commandent par ailleurs sa propre mathématisation de la biologie expérimentale.

Fisher montre ainsi que, lorsque l'on se penche sur le problème de la croissance végétale, il est nécessaire de recourir à une « loi mathématique hypothétique » et non à l'idée d'une représentation approchée. Or, il faut bien comprendre que l'hypothèse qu'il pratique n'a plus rien à voir avec les hypothèses métaphysiques qui postulent une co-naturalité entre les mathématiques et le monde. Cette loi hypothétique est un modèle en ce sens qu'elle n'est qu'une grille de lecture informationnelle et fictive des phénomènes. Elle ne suppose aucun enracinement dans la nature des phénomènes. Assez paradoxalement, mais d'une manière finalement compréhensible, c'est même de façon à être réellement objective au regard des expériences et des mesures effectivement faites qu'elle se défend de tout enracinement. L'objectivité de la mesure et de son interprétation commande le déracinement du formalisme. C'est donc déjà un modèle au sens où cette loi hypothétique s'oppose à une théorie prétendant dire l'essence. Elle rejoint bien l'idée moderne de modèle née auparavant chez Faraday et Maxwell, dans la physique de l'électromagnétisme, et popularisée par Boltzmann dans l'article '*model*' de l'*Encyclopedia Britannica* dès 1902[1]. Fisher, bien sûr, en connaissait l'existence et la nature. Grâce à cette polémique avec des physiologistes quantitativistes, on comprend que, selon Fisher, en particulier en matière de représentation mathématique de la croissance végétale, c'est bien en décollant du réel que le formalisme exprimera le mieux ce réel, pour nous qui voulons en comprendre et en contrôler les chaînes causales.

[1] Voir Annexe A.

CHAPITRE 2 – La loi d'allométrie : de la mesure absolue à la mesure relative

À la même époque, la physiologie expérimentale rassemble les suffrages puisque, au moyen des nouvelles méthodes statistiques, elle peut asseoir ses tentatives théoriques sur des confrontations réglées avec l'empirie. Aux côtés de l'agronomie, elle apprend ainsi à amplifier formidablement ses enquêtes expérimentales en maîtrisant les plans d'expérience et les techniques d'analyse de variance. Ayant entre-temps été à l'école de la génétique et de la biométrie, et à l'encontre de sa perspective naguère exclusivement sensible à un comportement supposé normal et déterminé, elle apprend à apprivoiser ce qu'elle se représente comme une *variabilité intrinsèque* et donc inévitable de tous les phénomènes vivants. Cette variabilité ne se présente plus à elle comme un obstacle rédhibitoire : elle peut désormais être contournée au moyen d'une prise en compte explicite de l'aléa dans le modèle et dans l'interprétation de l'expérience. La physiologie rencontre sur ce point la morphologie statistique.

Cependant, au contraire des agronomes et des généticiens, les physiologistes ne vont pas jusqu'à se donner des lois formalisant l'aléa. Ils ne vont d'ailleurs même pas renoncer au concept de « lois » déterministes. Ils vont ainsi longtemps chercher à expliquer les phénomènes de croissance par des « lois fonctionnelles » exprimées en des termes de mathématique analytique, séparant ainsi nettement la tâche, expérimentale, de la mathématisation statistique de celle, théorique, de la mathématisation analytique des processus physiologiques. Pendant cette période, la biométrie, avec ses modèles, est alors le simple pendant empirique des théorisations mathématico-physiologiques. La méthode des modèles statistiques fera certes entrer la physiologie dans une nouvelle ère expérimentale. Mais les représentations formalisées de la croissance des individus resteront exprimées au moyen de formules analytiques et à prétention théorique.

Il serait là aussi hors de propos de rapporter dans le détail la genèse de la notion de croissance allométrique dans le cadre de ces tentatives d'explications physiologiques et mathématiques de la croissance en général. Il nous suffira de rapporter l'essentiel du contenu scientifique de cette loi mathématisée, en prêtant surtout attention au cortège de notations épistémologiques auquel sa construction et sa légitimation ont pu donner lieu dans le contexte plus spécifiquement français qui nous intéresse. Dans ce cadre, il se trouve qu'il est une figure de premier plan : c'est celle de Georges Teissier. Son importance se mesure à l'ampleur de ses travaux, certes, mais aussi à l'influence idéologique qu'il a pu avoir, comme à l'étendu du pouvoir administratif qui a été le sien pendant un temps.

Nous ne rappellerons pas ici ni la vie, ni les responsabilités politiques, administratives et scientifiques (notamment dans la résistance puis à la direction du CNRS de 1946 à 1950[1]), ni la teneur des travaux considérables de Georges Teissier dans ses deux autres grands domaines de prédilection qu'étaient la zoologie et la génétique évolutive. Nous renvoyons pour cela aux études déjà assez nombreuses, notamment sur ce dernier sujet, dont celles de Jean Gayon[2] et de Nicolas

[1] Voir, sur ces points d'histoire administrative, [Picard, J.-F., 1991], pp. 103-117 et 133-134. Voir également l'article de [Burian, R. M. et Gayon, J., 1990] qui rapporte les démêlées de Teissier dans la querelle du lyssenkisme.
[2] [Gayon, J., 1992], pp. 370-384.

Givernaud[1]. Rappelons toutefois qu'à partir de 1928, Teissier, mathématicien et biologiste de formation, est en poste à la station maritime de Roscoff. C'est dans ce contexte que, dans l'esprit de la biométrie anglaise de Ronald A. Fisher, et à côté de recherches génétiques expérimentales, il se consacre d'abord à l'analyse statistique de phénomènes de croissance. Jean Gayon a déjà rapporté l'histoire précise du concept d'allométrie[2]. Dans son travail, on voit Huxley et Teissier s'accorder sur la notion d'allométrie, sans toutefois trouver un véritable accord sur le sens biologique de cette formalisation. Nous voudrions justement nous attarder sur le statut épistémique que Teissier donne à ses lois quantitatives et, en particulier, à sa loi d'allométrie. Alors que Jean Gayon travaille sur de nombreux textes antérieurs à 1937 pour établir l'origine précise du concept et de la forme de la loi dans les différents contextes où elle est employée, nous nous limiterons au texte bilan de 1937 et à ses riches explications épistémologiques. Certes, on y trouve surtout une rationalisation *a posteriori* de l'histoire de ces lois. Mais c'est pour mieux servir à une démonstration épistémologique qui, seule, nous intéressera ici. Nous y chercherons en effet à discerner plus précisément la valeur que Teissier confère aux formalisations ainsi qu'à la signification biologique de leurs variables. Nous verrons en quoi la « loi d'allométrie » constitue déjà, aux yeux de celui qui la propose et la diffuse en France, une sorte de tournant épistémologique dans la direction de ce qui sera nommé plus tard un « modèle mathématique ».

Comme en témoigne le premier chapitre de ce livre de 1937[3], l'objectif de Teissier consiste dans un premier temps à faire un tour d'horizon sur les « traductions »[4] mathématiques des « lois » de la croissance telles qu'elles existent à la fin des années 1920. Son but est bien sûr de nature théorique au sens où il cherche à mieux comprendre la nature des processus de croissance. Mais il est aussi pratique : essayer de discerner les phénomènes de croissance anormaux c'est-à-dire ceux qui dérivent excessivement loin de la moyenne et sont au-delà de la variabilité reconnue par ailleurs comme naturelle par les postulats de la biométrie. Teissier prend ainsi l'exemple de « la courbe de croissance d'un nourrisson »[5] et il évoque donc, implicitement, l'utilité qui pourrait être tirée de sa « traduction analytique »[6] précise pour le diagnostic médical. Les méthodes de la statistique et de la biométrie sont pour lui un moyen de parvenir à l'expression de lois mathématiques optimales, c'est-à-dire se présentant sous la forme de « relations fonctionnelles »[7], uniques et ramassées, et ayant de surcroît la propriété d'être ajustées le mieux possible aux déterminismes physiologiques.

Mais, dans un autre article, antérieur d'une année[8], Teissier précise bien qu'en biologie, au contraire de ce qui se passe pour les lois de la physique, il ne faut pas s'attendre à la possibilité de faire tendre vers zéro les dérives des données autour de la loi théorique. Si, en droit, la physique peut s'attendre à voir diminuer toujours ses erreurs de mesure au regard des prévisions de la loi, cela en améliorant ses dispositifs techniques et en faisant progresser l'acuité de ses instruments de mesure, la biologie est face à une variabilité irréductible et intrinsèque. C'est là que le transfert de la théorie des erreurs à la biométrie rencontre ses limites : aucun progrès technique ne lui permettra de réduire cette variabilité[9]. Ainsi, « les relations quantitatives les plus rigoureuses

[1] [Givernaud, N., 1999].
[2] Voir [Gayon, J., 2000].
[3] [Teissier, G., 1937], chapitre I, section I.
[4] [Teissier, G., 1937], p. 2.
[5] [Teissier, G., 1937], p. 1.
[6] Selon ses propres termes. Voir [Teissier, G., 1937], p. 2.
[7] [Teissier, G., 1936], p. 56.
[8] [Teissier, G., 1936] paru dans la *Revue de métaphysique et de morale*. Ce qui indique que Teissier trouve importante toute entreprise de légitimation épistémologique et philosophique de son travail.
[9] [Teissier, G., 1936], p. 56.

conservent toujours, lorsqu'elles portent sur les êtres vivants, certains caractères des lois statistiques »[1]. Ces caractères sont matérialisés par le recours à des outils mathématiques, comme la moyenne et l'écart-type, affectés l'un et l'autre de leur erreur probable au sens de Student. Ils ne doivent jamais être absents de l'énoncé d'une loi quantitative biologique puisque la variabilité est intrinsèque à l'objet d'étude. Toutefois, comme Teissier recherche des « relations fonctionnelles », c'est-à-dire des formules mathématiques de type analytique, l'aléa n'intervient pas dans la loi elle-même. Les statistiques servent seulement au dévoilement et à la présentation prudente de lois essentiellement non probabilistes. Même s'il partage sur ce point le causalisme de Fisher, Teissier donne donc un rôle relativement nouveau à la biométrie : elle est pour lui essentiellement un instrument de pondération et d'extraction de « lois quantitatives » et déterministes hors de la gangue que constitue sinon la complexité biologique. Il ne s'agit donc pas de s'arrêter au modèle statistique *vraisemblable* mais de revenir à un point de vue physiologique par le détour biométrique, il est vrai.

Ce qui est intéressant pour nous est le fait que, dans son texte volontiers pédagogique de 1937, Teissier distingue soigneusement entre les « descriptions quantitatives de la croissance » et les « lois élémentaires de la croissance ». À tel point que les descriptions quantitatives font l'objet d'une section à part, la première de l'ouvrage. Teissier y recense d'abord les « descriptions quantitatives » (de l'augmentation de la taille ou du poids des êtres vivants) appuyées sur ce qu'il appelle une « interprétation chimique »[2]. On comprend donc déjà que, dans l'épistémologie de Teissier, pour finir par être fondées biologiquement, les descriptions quantitatives doivent être *interprétées* d'une manière ou d'une autre. *A priori*, le déracinement qu'il autorise pour ses formalismes paraît nettement plus problématique que celui de Fisher. Nous allons donc tâcher de voir ce qu'il en est en analysant ses arguments critiques et épistémologiques tels qu'il les insère dans le texte technique de 1937.

Les « interprétations chimiques »

Soit donc les interprétations chimiques de la croissance. Teissier rappelle d'abord qu'en 1906, le biologiste et embryologiste germano-américain Jacques Loeb (1859-1924) avait admis le fait que la synthèse des nucléines dans l'œuf en segmentation était soumise à deux influences contradictoires : « l'une est la loi d'action de masse qui veut, puisque l'œuf ne reçoit aucune nourriture du milieu extérieur, que la vitesse de formation des noyaux diminue à mesure que leur nombre augmente ; l'autre est la présence d'une catalyse nucléaire qui fait que la vitesse augmente proportionnellement au nombre de noyaux déjà formés. »[3] On obtient donc l'équation

[1] [Teissier, G., 1936], p. 57. C'est là rejoindre l'indéterminisme de Fisher.
[2] [Teissier, G., 1937], p. 3.
[3] [Teissier, G., 1937], p. 3. En 1899, Jacques Loeb effectue la première parthénogenèse expérimentale à partir d'œufs vierges d'oursins plongés dans une solution d'eau de mer additionnée de chlorure de magnésium. Voir le chapitre de A. Tétry *in* [Taton, R., 1961, 1995], p. 527. A. Tétry rappelle que ce déclenchement purement chimique d'une ontogenèse rencontra de vives oppositions et contestations avant d'être admis. « En 1906, Loeb fait connaître une nouvelle méthode plus efficace ; il en déduit que la fécondation fait intervenir des mécanismes chimiques et qu'il convient de distinguer deux stades essentiels dans les processus : *l'activation* de l'œuf, dont la perméabilité et les oxydations augmentent, et la *régulation* qui déclenche l'ontogenèse », A. Tétry *in* [Taton, R., 1964, 1995], p. 631.

différentielle « logistique »[1] suivante dont la formulation, dans ce même contexte biologique, est proposée par le physiologiste T. Brailsford Robertson en 1908[2] :

$$\frac{dx}{dt}=Kx(a-x)$$

Ainsi, Robertson redécouvre de son côté la courbe en S. Il l'appelle la courbe « autocatalytique » en référence aux réactions chimiques du même nom. Mais, selon lui, le fait qu'elle décrive aussi bien la croissance de noyaux cellulaires que celle des plantes, des animaux et de l'homme, indique qu'il existe chez les êtres vivants une substance biochimique autocatalytique unique, à l'origine de tous les processus de croissance[3]. Selon Teissier, en revanche, le phénomène biologique est certes « ramené » par là à « un phénomène bien connu dans la chimie des ferments »[4]. Mais alors que cette assimilation de la croissance biologique à un phénomène chimique était « légitime »[5] pour le cas des noyaux cellulaires et des cytoplasmes, Teissier conteste vigoureusement son emploi pour des organismes entiers[6]. Si, au niveau cellulaire, la loi mathématique de Loeb est valable biologiquement, c'est parce que son interprétation chimique est biologiquement fondée et fonde en retour la traduction mathématique. La loi mathématique est donc biologiquement valable et elle abandonne son simple statut de « description quantitative » en devenant une « loi de la croissance » authentique à partir du moment où elle est légitimement interprétée et biologiquement construite. Cependant, Teissier rappelle que de nombreux biologistes ont, sans égard pour cette condition, ajusté empiriquement cette loi quantitative pour traduire des croissances de l'organisme entier. Il se dit rigoureusement opposé à ce genre de procédé. L'argument de Teissier en défaveur de l'emploi de cette loi pour l'organisme tient au fait que l'hypothèse d'un système clos ne tient plus du tout dans le cas d'un animal qui trouve de quoi se nourrir dans son milieu extérieur, cela tout au contraire de l'œuf[7]. Comme l'interprétation chimique ne vaut plus à cette échelle, ce n'est donc plus une loi quantitative interprétable pour lui. Donc « on tombe dans le pur arbitraire »[8], selon Teissier, si on s'ingénie à l'employer pour l'organisme entier.

Mais Teissier se fait tout de même une objection : pourquoi cette loi, qui n'est rationnellement légitime qu'à l'échelle cellulaire, vaut-elle encore empiriquement à l'échelle de l'organisme, ou des organes, lorsqu'on la complexifie un peu ? Parce que, selon lui, Robertson retrouve ce faisant,

---

[1] C'est en 1920 que le terme de "logistique" a été définitivement adopté par Raymond Pearl (1879-1940) et Lowell J. Reed pour suivre en cela la suggestion terminologique antérieure du mathématicien belge Pierre-François Verhulst (1804-1849) remontant à 1838. Ils désignèrent par ce qualificatif la courbe en S (ou sigmoïde) suivie par la croissance d'une population. Voir [Kingsland, S. E., 1985, 1995], pp. 64-66.

[2] Dans son article intitulé "On the Normal Rate of Growth of an Individual and Its Biological Significance", paru dans *Archiv für Entwicklungsmechanik der Organismen*, 25, 1908, pp. 581-613. Ces références nous sont données par [Kingsland, S. E., 1985, 1995], p. 261.

[3] Voir [Kingsland, S. E., 1985, 1995], p. 66.

[4] [Teissier, G., 1937], p. 3.

[5] « Il était légitime de calquer sur un modèle chimique usuel le schéma de cette synthèse », [Teissier, G., 1937], p. 4. Teissier emploie ici le terme « modèle » mais au sens du « modèle » normatif, que l'on doit suivre, que l'on doit « calquer » parce qu'il est réaliste. La loi quantitative est pour sa part conçue comme un « schéma », donc comme quelque chose d'abstrait, d'approximatif et qui approche la réalité biologique d'abord à un niveau seulement descriptif et phénoménologique avant d'être correctement « interprétée », s'il y a lieu.

[6] [Teissier, G., 1937], p. 4. En 1909, le biologiste Raymond Pearl avait fait la même critique à Robertson. Voir [Kingsland, S. E., 1985, 1995], p. 67.

[7] Sur ce point, l'argument physiologique de Teissier se distingue très clairement de la critique de Pearl. Ce dernier s'était contenté de rappeler qu'une similarité entre des relations quantitatives n'implique pas une identité qualitative du mécanisme sous-jacent. Voir [Kingsland, S. E., 1985, 1995], p. 67.

[8] [Teissier, G., 1937], p. 4.

mais sans s'en apercevoir, la vieille loi logistique de Pierre-François Verhulst (1804-1849) applicable à la croissance des *populations* et remontant à 1838. Or, dès 1925, le physicien et chimiste Alfred J. Lotka (1880-1949) a montré qu'elle « représentait le mode d'accroissement le plus simple d'un agrégat cellulaire »[1]. En ce sens, Teissier rappelle qu'il existe un pont indéniable entre les lois de la *croissance* des agrégats de cellules, à « ontologie métrique » pourrions-nous dire, et les lois de la *multiplication*, à « ontologie populationnelle », de la dynamique des populations[2]. Teissier souligne que cette possible identification (valable pour les cas de croissance d'agrégats très simples) a d'abord été inaperçue, notamment par Robertson. Elle permet pourtant de légitimer en partie le recours à la loi de Loeb pour l'organisme entier.

C'est alors l'occasion pour Teissier d'énoncer une remarque épistémologique d'importance : « une formule a toujours un contenu beaucoup plus riche que ne le croit celui qui l'a établie »[3]. Autrement dit, la formulation mathématique aurait toujours la faculté de masquer les sources de sa véritable « légitimité » aux yeux mêmes de celui qui la produit. Comme dans un authentique mouvement dialectique, la première donation de signification en date ne s'identifierait pas avec la signification effective de la formule, c'est-à-dire avec son contenu biologiquement significatif. Cette signification effective de la « formule » mathématique ne se révèlerait qu'après une nécessaire critique des premiers travaux de description et de formulation. Selon Teissier, cette critique doit s'armer du critère de la signification biologique et physiologique des éléments qui interviennent dans la « formule ».

Mais pour autant, et cela est important à noter, à la différence du cas traité par Loeb, Teissier ne considère pas que cette similitude puisse être tenue pour une interprétation totalement légitime. Rapporter la croissance d'un organe ou d'un organisme à la dynamique des populations cellulaires dont il est composé ne constitue pour lui en rien une légitimation définitive. Car il n'y a là qu'une similitude « formelle » qu'il juge « artificielle »[4] :

« C'est à ses qualités formelles*, qui n'ont strictement rien à voir avec l'autocatalyse, que la formule de Robertson doit sa* valeur pratique *… »*[5]

C'est bien pour Teissier une critique d'« ordre biologique » : ceux qui croient avoir interprété chimiquement la loi logistique pour l'organe ou l'organisme se rendent coupables de supposer que l'être vivant se réduit à quelque chose comme une « substance vivante » assimilable à une « masse amorphe et homogène »[6] et de composition chimique très simple. Le succès relatif de ces lois de croissance pour l'organisme entier ne tient pas au fait qu'elles sont interprétables chimiquement, comme veulent nous le faire croire des chercheurs comme Robertson, mais seulement au fait qu'elles sont formellement identiques à des lois connues mais très formelles (car

[1] [Teissier, G., 1937], p. 5. Voir [Lotka, A. J., 1925, 1956], p. 65. Dans le passage auquel Teissier fait allusion, Lotka argue du fait que le deuxième membre F de l'équation de croissance générale pour X (quand $dX/dt = F(X)$) doit être un polynôme de plus faible degré (le moins complexe) mais permettant en même temps à X(t) de ne pas être une exponentielle pour donner une limite à la croissance, comme c'est toujours le cas dans la réalité. F(X) doit donc être un polynôme du second degré en X. Pour une exposition générale des propositions de Verhulst, Pearl et Lotka dans un contexte d'histoire de la dynamique des populations, voir [Deléage, J.-P., 1991, 1994], chapitre 7.

[2] Cette connexité entre les problématiques morphogénétiques et populationnelles, assumée très tôt en France avec Teissier notamment, contribuera à donner sa forme à l'école de biométrie qui y prospérera par la suite, comme nous le verrons.

[3] [Teissier, G., 1937], p. 8.

[4] [Teissier, G., 1937], p. 6.

[5] [Teissier, G., 1937], p. 5. C'est nous qui soulignons.

[6] [Teissier, G., 1937], p. 5.

reposant sur une homogénéisation complète des individus d'une population) de la dynamique des populations.

Pour Teissier donc, en biologie, l'identité formelle ne légitime pas en soi le recours à une loi quantitative au niveau théorique quand bien même, au niveau pratique, elle peut avoir un intérêt. Ainsi, pour lui, alors que l'interprétation populationnelle des lois de croissance chez les animaux supérieurs est une légitimation très imparfaite parce que formelle, les théories chimiques de cette même croissance biologique macroscopique ne donnent en revanche rien d'autre que « des schémas à peu près vides de tout contenu concret »[1]. Il met cette complète erreur sur le compte d'un « mécanisme outrancier », et il assimile le travail que font ces théories chimiques de la croissance globale à l'étude d'une pure « représentation verbale dont la rigueur apparente ne résiste pas à la plus simple critique »[2]. Teissier vise donc ici au premier chef le « mécanisme » qui semble manifestement revendiqué par ailleurs par Jacques Loeb dans son ouvrage populaire *The Mechanistic Conception of Life : Biological Essays*, paru en 1912[3]. Dépourvues de toute interprétation, même au niveau formel, ces « formules » chimico-mathématiques ne sont pour Teissier que « métaphores brillantes »[4], certes parfois utiles, mais stérilisantes à terme pour la pensée biologique. On notera ici la fréquence des termes péjoratifs renvoyant au caractère purement verbal, voire linguistique (comme le mot « métaphore »), d'une représentation qui tourne à vide, d'un jeu sur les mots qui n'a donc pas de prise concrète sur la réalité biologique. Il tire de cette mise en garde générale une condamnation des approches d'emblée physicochimiques de la croissance organique. Même si l'objectif réductionniste peut en être, à terme, légitime dans le cadre d'un matérialisme conséquent qu'il prône par ailleurs[5], cette interprétation risque d'être très longtemps encore prématurée[6]. Selon lui, il ne faut pas croire que l'on puisse dès aujourd'hui la formuler.

Les interprétations métaboliques : Bertalanffy (1932)[7]

Teissier se montre plus convaincu par l'approche métabolique de Ludwig von Bertalanffy (1901-1972), inspirée au départ par le physiologiste allemand A. Pütter[8], dans la mesure où elle manifeste la traduction par les équations mathématiques de principes biologiques incontestables et valant de surcroît à l'échelle physiologique, donc à la bonne échelle selon Teissier. Lorsqu'un organisme entier croît, en effet, on peut considérer que son métabolisme est décomposable en

[1] [Teissier, G., 1937], p. 7.
[2] [Teissier, G., 1937], p. 7.
[3] En fait, l'historien des sciences américain Philip J. Pauly a montré qu'il y a eu une sorte de malentendu sur le caractère excessif de ce terme. Au vu de la polémique montante, Loeb avait voulu modifier *in extremis* son titre en *The Control of Life*. Mais il était trop tard pour l'éditeur. Même si Loeb avait d'abord travaillé à développer une approche de type « ingénieur » dans la biologie expérimentale, à l'époque (1912), il était plutôt du côté de Hans Driesch et de sa notion d'« entéléchie » telle qu'elle était censée intervenir dans l'embryogenèse. En fait, il voulait attaquer les positions bergsoniennes en indiquant que la biologie devait rester fondée sur une thèse matérialiste. Prôner le « mécanisme » signifiait simplement pour lui en appeler au bon sens et à la prévalence de l'attitude expérimentale en science. Teissier, et beaucoup d'autres en revanche, ont pris ce terme au sens fort, c'est-à-dire au sens d'une épistémologie et d'une philosophie de la nature qui pensait qu'à terme tous les processus biologiques pourraient être expliqués en termes de mouvements de nombreux constituants élémentaires en interaction mécanique les uns avec les autres, cela sur le modèle d'une machine d'ingénieur. Voir [Pauly, P.-J., 1987], pp. 141-149.
[4] [Teissier, G., 1937], p. 7.
[5] Voir nos analyses *infra*, sur le « physiologisme dialectique » de Prenant et Teissier.
[6] On voit que là est directement visée l'école mécaniste américaine (avec Loeb) ainsi que l'école de biophysique dont nous parlerons plus bas.
[7] Voir [Bertalanffy (Von), L., 1968], p. 140.
[8] Voir [Bertalanffy (Von), L., 1968], p. 272.

deux phénomènes opposés[1] : l'assimilation ou anabolisme (noté 'a') d'une part, la désassimilation ou catabolisme (noté 'c') d'autre part. Le principe de cette théorie est jugé « très simple et très naturel »[2] par Teissier. Bertalanffy peut alors écrire l'équation de la variation du poids x en fonction du temps :

$$\frac{dx}{dt}=\alpha a(t)-\gamma c(t)$$

où α et γ sont des constantes.

Mais comme Bertalanffy « suppose que a est proportionnel à la surface, c'est-à-dire à la puissance 2/3 du poids, et que c est proportionnel au poids », en écrivant $x = l^3$ où l est homogène à la taille de l'organisme, on obtient une équation simplifiée et soluble :

$$\frac{dl}{dt}=K-\mu l$$

La taille l(t) dessine alors un « arc asymptotique d'exponentielle »[3] en fonction du temps. Ce qui, Teissier le rappelle, a été empiriquement confirmé chez la croissance de certains poissons. L'équation s'« applique »[4] donc bien pour lui.

De façon très significative, au sujet de cette « théorie métabolique » quantifiée, Teissier est bien moins critique que pour les « schémas puérils »[5] inspirés de la chimie. Elle est pour lui recevable dans la mesure où, dit-il, elle est « presque tautologique »[6]. Mais qu'entend-il ici par « tautologique » ? Teissier ne le précise malheureusement pas. Nous suggérons de comprendre ce terme comme renvoyant au fait que les fonctions mathématiques a(t) et c(t) traduisent pour lui immédiatement et sans conteste une évolution quantitative de phénomènes physiologiques déjà *par nature* quantifiables depuis leur mise en évidence expérimentale progressive par les physiologistes du 19ème siècle. Bertalanffy ne fait ainsi que traduire l'hypothèse de base, voire la définition même de la physiologie. Son apport n'est ainsi pas du tout dans l'explication constructive de la formulation mathématique, il est dans la répétition, mais dans une autre langue, d'un principe depuis longtemps incontesté, d'où ce terme de « tautologie » sous la plume de Teissier. Il est donc des cas où les lois quantitatives sont tautologiques alors même qu'elles sont bien des traductions en langage mathématique de phénomènes biologiques. Du moins ont-elles le mérite de ne pas violenter la physiologie. C'est pourquoi elles sont recevables pour Teissier.

Mais il est une chose que Teissier n'admet pas dans l'approche de Bertalanffy. C'est le passage systématique de la première formulation mathématique de sa loi à la deuxième. Car Bertalanffy se livre alors à des suppositions qui, là, en revanche, font violence à la biologie. Ce sont des hypothèses très lourdes et qu'on ne peut que très rarement voir vérifiées dans la nature. Pour affirmer que le taux de désassimilation est proportionnel au poids, il se fonde par exemple « sur le fait que, chez un animal en inanition, le taux de la dégradation protéique est constant »[7]. Mais, si le fait est avéré en l'occurrence, c'est la généralisation d'une telle observation à toute

[1] Voir [Teissier, G., 1937], p. 8 et [Bertalanffy (Von), L., 1968], p. 140.
[2] [Teissier, G., 1937], p. 8.
[3] [Teissier, G., 1937], p. 8.
[4] [Teissier, G., 1937], p. 8.
[5] [Teissier, G., 1937], p. 8.
[6] [Teissier, G., 1937], p. 9.
[7] [Teissier, G., 1937], p. 9.

forme de désassimilation qui est contestable selon Teissier. Autant donc, quand on en reste à une traduction tautologique, la loi peut globalement valoir, autant quand on tâche de la simplifier mathématiquement et de la résoudre afin de la mesurer à l'expérience, on se livre à des hypothèses qui, elles, sont gratuites et « arbitraires »[1]. C'est donc à ce niveau là que la méthode de Bertalanffy retrouve l'« arbitraire » que manifestait en revanche dès l'abord l'approche chimique de Robertson. L'équation de Bertalanffy est donc taxée elle aussi de « schéma ». Mais, selon Teissier, sa situation n'est pas aussi désespérée que celle des théories chimiques de la croissance organique. Dans la mesure où la physiologie est globalement prise en compte et formulée dans l'équation générale, il suffirait peut-être de « suivre de plus près la réalité physiologique » pour « arriver à des résultats non dépourvus d'intérêts »[2].

Comprenons que ce qui gêne Teissier devant l'équation de Bertalanffy, ce n'est pas le fait qu'elle n'ait pas de sens biologique, bien au contraire. C'est le fait que restant trop proche d'une formulation conceptuelle et qualitative, elle ne parvient pas facilement à redescendre vers ce que Teissier appelle le « concret » pour rencontrer et se confronter aux mesures expérimentales sur leur terrain. Elle reste un schéma qualitatif et, à ce titre, elle promet plus que ce qu'elle peut réellement donner. À l'inverse, les théories chimiques se rendent coupables d'un excès de mécanisme alors que le caractère biologique devrait aussi transparaître dans leurs équations pour que l'on puisse estimer que l'on a réellement des lois interprétées donc « légitimes » biologiquement. En un sens, et pour le dire un peu trivialement, Bertalanffy vise trop haut alors que les physicochimistes et autres biophysiciens visent trop bas.

Par la suite, en ayant auparavant évoqué encore d'autres types de lois sur lesquelles nous ne reviendrons pas ici et auxquelles il reproche, à peu de choses près, la même chose qu'à celle de Bertalanffy, Teissier conclut ce bilan sur une critique générale : on a des théories éventuellement utilisables au niveau pratique, mais elles ne contribuent pratiquement en rien « à la connaissance scientifique du phénomène qu'elles prétendent étudier »[3]. Dans l'article de 1936, sa critique est plus précise encore puisqu'elle utilise les termes de « système » et d'« analogie » :

« Tout en reconnaissant l'intérêt que peuvent avoir certaines comparaisons entre l'évolution des systèmes complexes, beaucoup plus simples, qui sont l'objet des études du physicien et du chimiste, il [le biologiste] évitera de se laisser duper par les analogies, presque toujours trompeuses, qui peuvent exister entre les processus biologiques et les processus physicochimiques qu'il paraît naturel de rapprocher d'eux. »[4]

Après une telle analyse du travail de Teissier, on pourrait se dire qu'il en reste à l'idée qu'il ne faut rechercher pour toutes lois mathématiques que celles qui décrivent réellement la nature des phénomènes. Ce sont ces lois qui sont construites mathématiquement à une échelle à laquelle les éléments ont un sens du point de vue physiologique. Ces lois doivent se référer à un mécanisme physiologique réaliste et donc non fictif. Teissier paraît donc ici bien éloigné de la pratique des modèles fictifs telle qu'elle se développe en biométrie. Pourtant, dans la suite de son travail, s'il ne cède jamais sur la conservation du sens biologique des éléments pris en compte, il sera amené à construire un type de loi rigoureux et pourtant délié de toute référence absolue,

[1] [Teissier, G., 1937], p. 9.
[2] [Teissier, G., 1937], p. 9.
[3] [Teissier, G., 1937], p. 12.
[4] [Teissier, G., 1936], p. 81. Il est probable que Bertalanffy soit directement visé dans ce passage. Ces analogies y sont également qualifiées de « schémas mécanistes » à la nature douteuse, voire de « simples métaphores », *ibid.*, p. 82.

déraciné de son substrat en ce sens, puisque ne faisant intervenir que des relations métriques internes à l'organisme en croissance.

Voici la méthode d'approche qu'il préconise en effet de son côté et qui va justifier le cadre de son propre travail :

« Si l'on veut arriver à une compréhension véritable des processus de la croissance, il faut abandonner ces exercices plus algébriques que biologiques et, avant de prétendre interpréter les processus les plus complexes, essayer de connaître les lois élémentaires du phénomène. »[1]

Il faut donc commencer par des expérimentations sur des phénomènes de croissance affectant des êtres organiques élémentaires car c'est là que l'on aura toutes les chances de pouvoir à la fois formaliser de façon calculable et donner un sens biologique aux variables intervenant dans ses formules mathématiques. La formalisation sera ainsi en même temps *mathématiquement calculable* (donc comparable à l'empirie) et *biologiquement signifiante*. Car il faut pouvoir tenir les deux ensemble pour Teissier. C'est bien, croyons-nous, la signification épistémologique essentielle pour lui de ce commandement à commencer par l'élémentaire.

Les « lois élémentaires » de la croissance

Pour Teissier, il faut donc commencer par l'expression physiologiquement raisonnée de lois quantitatives élémentaires. C'est Jacques Monod (1910-1976)[2], alors inscrit en thèse à la Sorbonne, qui a mené ces recherches avec Teissier en 1935. Monod et Teissier, en cultivant des microorganismes appelés *Glaucoma piriformis* et en prenant en compte la variation de la relation entre le taux de division de ces microorganismes et la concentration en substances nutritives du milieu de culture, avaient déjà obtenu une formulation de la loi logistique plus complexe et permettant de traduire une des premières particularités physiologiques des êtres pluricellulaires[3].

Mais Teissier considère que l'on doit aussi prendre en compte « le fait que les déchets qui s'accumulent dans le milieu de culture exercent une action inhibitrice sur la multiplication des cellules »[4]. On ne peut pas non plus négliger le fait que ces microorganismes, comme les animaux supérieurs, développent une « énergie d'entretien » et une « énergie de croissance »[5]. En conséquence, afin de tenir compte de ces autres relations physiologiques élémentaires entre les cellules tout en ne complexifiant pas trop d'emblée l'objet d'étude, il est préférable de s'attaquer ensuite à la croissance des cultures de tissus organiques. Les tissus peuvent en effet être considérés aussi bien comme des « organismes rudimentaires que comme des populations cellulaires »[6]. Ils permettent donc d'insérer délicatement et progressivement du physiologique dans du populationnel. Selon la perspective de Teissier, les lois quantitatives de la dynamique des populations, d'abord trop formelles, vont ainsi gagner en réalisme physiologique grâce à cette recherche empirique qui se place délibérément aux frontières des objets d'étude et des disciplines.

---

[1] [Teissier, G., 1937], p. 13.
[2] Pour le contexte historique plus général du travail de Monod à l'époque comme pour d'autres références sur ses débuts dans la recherche, voir [Morange, M., 1994], pp. 195 *sqq*.
[3] La liste intégrale des titres et des références des articles de Monod figure sur le site Internet de l'Institut Pasteur, à l'adresse suivante : http://www.pasteur.fr/infosci/biblio/bibliogr/monod.html#1.
[4] [Teissier, G., 1937], p. 15.
[5] [Teissier, G., 1937], p. 15.
[6] [Teissier, G., 1937], p. 15.

Teissier évoque ensuite son travail avec Boris Ephrussi (né en 1901) effectué à l'université *Caltech* en 1930 et publié en 1931[1] : l'étude de la croissance résiduelle[2] des cultures de fibroblastes[3]. Cette croissance ne se produit qu'aux dépens des réserves accumulées par les cellules. Tout en manifestant un phénomène véritablement physiologique, elle est donc plus simple à formuler car on peut supposer qu'elle ne dépend que de deux facteurs : la quantité de réserves disponibles et le nombre de cellules susceptibles de se diviser. Ephrussi et Teissier arrivent à la « traduction » de cette croissance sous forme d'une équation différentielle simple, soluble et dont l'ajustement aux observations est très bon. Une telle introduction des paramètres physiologiques peut ensuite s'étendre aux plantules[4] essentiellement parce qu'on peut aussi les faire croître en ne leur conférant que des ressources limitées. Teissier en tire une conclusion importante : « Dans le cas des plantules, comme dans celui de la croissance résiduelle, nous avons pu pousser notre analyse jusqu'à son terme logique : l'énoncé d'une loi quantitative aussi facile à traduire en langage biologique qu'en langage mathématique. »[5] Ainsi, pour Teissier, on a dans ce cas réellement affaire à une loi quantitative de la croissance physiologiquement (donc légitimement) interprétée parce que tous les paramètres introduits ont « une signification biologique précise »[6]. C'est la simplicité du matériel étudié qui, selon Teissier, a permis cette traduction quantitative légitime[7]. Cette loi peut s'étendre, si on la complexifie encore, à la croissance de l'embryon de truite. La complexification physiologique et mathématique consiste dans ce cas à considérer que les réserves du sac vitellin ne servent pas seulement à la croissance mais aussi partiellement à l'entretien de l'embryon. Pour le poids x de l'embryon et la quantité y de réserves, on obtient alors les équations suivantes :

$$\frac{dx}{dt}=Kxy \qquad \text{et} \qquad dy = - dx - K_1 x dt$$

Ces équations ne conduisent malheureusement pas à une solution analytique simple[8]. Et Teissier déplore qu'on ne puisse l'exprimer à l'aide de fonctions élémentaires. Selon lui, l'attaque

---

[1] C'est l'occasion pour nous de faire remarquer que dans ce texte pédagogique, Teissier n'hésite pas à inverser la chronologie. Ce qui indique là un cas manifeste où le contexte de recherche n'est pas le même que le contexte de justification. Mais ce sont ces distorsions volontaires qui nous intéressent dans la mesure où elles mettent bien en évidence les options d'une épistémologie particulière de la mathématisation en biologie, celle de Georges Teissier.

[2] « La croissance résiduelle est celle que l'on observe lorsqu'on repique un fragment détaché d'une culture nourrie d'extrait embryonnaire dans un milieu dépourvu de cet élément nutritif », [Teissier, G., 1937], p. 16.

[3] « Les fibroblastes humains sont les cellules spécifiques du tissu conjonctif comme le derme de la peau, la chorion du tube digestif, les tendons ou la paroi des veines et des artères ; ce sont des cellules isolées qui baignent dans le milieu extracellulaire… », *Encyclopaedia Universalis*, article « cellule » de Pierre Favard, 1989, CD-ROM 1995, Tome 5, p. 171c.

[4] Etape de l'embryogenèse des plantes qui suit la germination et pendant laquelle elles disposent déjà de leurs premiers organes.

[5] [Teissier, G., 1937], p. 19.

[6] [Teissier, G., 1937], p. 19.

[7] Cet argument est très proche de celui que Bachelard mettra en œuvre dans *Le matérialisme rationnel* à propos de la chimie. Voir [Bachelard, G., 1953], pp. 81-82. Pour pouvoir « rationaliser » un phénomène naturel complexe, il faut d'abord le simplifier artificiellement, en faire quelque chose comme une abstraction matérielle pour le mettre en phase avec la raison abstractive et quantifiante. Ainsi la chimie a-t-elle progressivement dissous les appels au vécu subjectif, au ressenti et au psychologisme inspiré, en créant matériellement des « substances sans accidents », en série et normalisée. C'est en abstrayant son matériau sans lui ôter pour autant sa matérialité (grâce à la chimie de synthèse) qu'elle a congédié le vécu qualitatif pour accueillir le rationnel quantitatif. L'abstraction rationnelle, en devenant une pratique matérielle du monde, autorise sa rationalisation. De même pourrait-on dire, c'est en choisissant un substrat organique « élémentaire » du point de vue de sa physiologie qu'une rationalisation de la physiologie devient possible, pour Teissier.

[8] [Teissier, G., 1937], p. 20.

par le calcul numérique approché donne cependant une courbe de croissance conforme aux faits observés.

Ce qui est au fond également instructif dans ce cheminement que nous communique Teissier, c'est qu'il y est souligné l'idée qu'on ne peut traduire mathématiquement des lois physiologiques de la croissance que si l'on intègre dans cette traduction mathématique une complexité analytique de même ordre, ou en tout cas croissant dans le même sens, que celle du substrat biologique. Et chaque paramètre nouveau ou chaque relation nouvelle entre les variables doit rendre compte d'un fait physiologique précis et auparavant conceptualisé et verbalisé dans le langage de la physiologie et de la biologie. Si l'on voulait passer à l'embryon du mammifère, comme celui de la souris par exemple, Teissier indique qu'il faudrait prendre en compte un nouveau fait physiologique : les substances nutritives viennent dans ce cas soit de la mère, au début de la croissance, soit du milieu extérieur, par la suite. Or, il existe des mesures expérimentales sur la souris. Teissier précise qu'il a reculé devant la difficulté mais sans en expliquer outre mesure les raisons : « on rencontrerait sans doute dans cette étude de très graves obstacles, dont il est d'ailleurs bien inutile de vouloir imaginer la nature »[1]. Nous pouvons conjecturer de notre lecture des pages précédentes qu'ils seraient de nature mathématique. Non seulement les équations différentielles ne donneraient pas lieu à des solutions analytiques, mais sans doute n'y aurait-il même pas moyen d'écrire des équations différentielles, c'est-à-dire de proposer une traduction mathématique analytique des relations physiologiques impliquées.

La recherche de lois quantitatives pour la croissance peut donc sembler être dans une impasse sévère à cause de ce mur de la complexification mathématique des traductions des faits physiologiques. À la fin de son premier chapitre, Teissier dramatise un peu le tableau de cette situation pour nous préparer à saisir ce qu'il va nous présenter, ensuite et pour finir, comme une issue partielle mais déjà victorieuse. C'est ce moment qu'il choisit pour nous présenter (toujours dans une chronologie rationalisée *a posteriori*) une issue inattendue, pourrait-on dire, celle de la « croissance relative ». Ce règlement du problème de la complexification des traductions, un peu biaisé du fait qu'il contourne curieusement l'obstacle au lieu de l'affronter, mérite d'être restitué dans ses choix techniques et épistémologiques car, dans la biologie de la morphogenèse et, en particulier, dans la biologie française, il constituera une sorte de paradigme de ce que l'on appellera plus tard un « modèle mathématique ».

L'allométrie ou la « loi quantitative » de la « croissance relative »

Passer de la considération de la « croissance absolue » à celle de la « croissance relative » relève en effet d'un glissement épistémologique lourd de sens au regard du problème de la quantification du vivant. Pour en prendre l'exacte mesure, il nous faut restituer le raisonnement de Teissier en ses grandes lignes.

Prenant acte du fait qu'on ne pourra passer aisément aux traductions mathématiques de la croissance des mammifères, Teissier propose de ne pas s'attaquer à ce nouveau problème des sources variables de substances nutritives pour l'organisme entier mais de se faire la remarque suivante : finalement, ce que lui ont enseigné les réussites antérieures, c'est l'importance fondamentale et permanente de la fonction nutritive dans la croissance. Et c'est seulement de sa complexification et de ses variations que vient ce mur qui nous empêche de passer aux lois de croissance des animaux supérieurs. Voici la formulation d'un autre problème qui lui serait alors

[1] [Teissier, G., 1937], p. 21.

venu à l'esprit (il ne nous dit pas comment) : « nous pouvons nous demander comment se comporteraient l'un par rapport à l'autre deux agrégats cellulaires constitués d'éléments différents et qui se trouveraient placés dans les mêmes conditions de nutrition »[1]. Ce schéma expérimental hypothétique peut être mis en œuvre avec des cultures voisines de plusieurs tissus ou colonies bactériennes situées sur un même milieu nutritif. Or, c'est bien ce même schéma expérimental qui se trouve être aussi réalisé, quoique approximativement, chez les animaux supérieurs, puisqu'ils sont dotés de tissus et d'organes hétérogènes tous desservis par le même sang ! Puisqu'on ne peut exprimer simplement la croissance de ces organes ou de l'organisme dans son ensemble en fonction de la quantité de substances nutritives, il paraît donc envisageable à Teissier de faire disparaître de l'équation la nutrition de chaque organe pour ne plus évaluer sa croissance qu'à l'aune de celle d'un autre organe. Ainsi la complexité ne sera pas négligée, elle sera simplement occultée par les équations et par le fait qu'on ne considère plus le même type de relation. On passe, ce faisant, de la relation mathématique entre la masse organique et le temps absolu à une relation mathématique entre une masse et une autre masse. Or, grâce au partage de la substance nutritive (de par la circulation sanguine), les équations permettent en effet de faire disparaître la variable « quantité totale d'aliment »[2] qui portait avec elle la promesse d'une complexification mathématique intraitable. Voici comment :

« Nous supposerons alors : d'une part, qu'en première approximation la quantité d'aliments absorbée par un organe en un temps donné est à la fois proportionnelle à la masse de cet organe et à la quantité totale d'aliments disponible au même instant ; d'autre part, qu'une fraction déterminée de l'aliment sert à la croissance. Ces hypothèses s'écrivent, x étant la masse de l'organe, m celle de l'aliment qu'il absorbe, A la quantité d'aliments disponibles, λ_1 et λ_2 des constantes :

$$dm = \lambda_1 x A\, dt$$
$$dx = \lambda_2\, dm$$

d'où:

$$dx = \lambda_1 \lambda_2 x A\, dt$$

Le même raisonnement peut être fait pour un autre organe y et l'on aura de même :

$$dy = \mu_1 \mu_2 x A\, dt$$

d'où :

$$\frac{1}{y}\frac{dy}{dt} = \frac{\mu_1\mu_2}{\lambda_1\lambda_2}\frac{1}{x}\frac{dx}{dt}$$

ou en posant :

$$\alpha = \frac{\mu_1\mu_2}{\lambda_1\lambda_2}$$

$$\frac{1}{y}\frac{dy}{dt} = \alpha\frac{1}{x}\frac{dx}{dt} \qquad \text{et} \qquad y = b\, x^{\alpha}\text{»}$$[3]

[1] [Teissier, G., 1937], p. 21.
[2] [Teissier, G., 1937], p. 21.
[3] [Teissier, G., 1937], pp. 21-22.

C'est cette relation $y = b\ x^{\alpha}$ que l'embryologiste américain Julian S. Huxley et Teissier, d'un commun accord[1], ont appelé « la loi d'allométrie » (de « *allos* », autre, et « *metron* », mesure) pour régler des problèmes de terminologie et pour rappeler l'hétérogénéité dans la croissance que cette loi est censée traduire.

Une loi d'abord empirique, puis physiologiquement interprétée et légitimée

Or, si Teissier reconnaît que de nombreux biologistes y avaient recours avant lui, il considère que les travaux auxquels il a participé ont définitivement établi ce qu'il appelle, là aussi, une « interprétation physiologique »[2]. Car les auteurs précédents, dont Huxley, n'avaient pas utilisé la construction mathématique précédente, physiologiquement justifiante selon lui, de la loi d'allométrie. Or, c'est par cette construction que Teissier y est explicitement parvenu. Donc la justification formelle et quelque peu finaliste qui prévalait jusqu'à présent (la fonction puissance, disait-on, est la fonction « la plus simple »[3] qui puisse relier la variation du poids d'un organe avec celle d'un autre) est déclassée par l'interprétation physiologique. De même que la loi empirique de Robertson n'était pas légitimée avant son interprétation populationnelle (et même encore incomplètement, après la découverte de cette interprétation), de même la loi d'allométrie conserve une « justification abstraite »[4] tant qu'on ne l'a pas rapportée au substrat biologique en son fonctionnement physiologique. Là encore, la formule allométrique contenait plus que ce que ses auteurs pensaient y avoir celé. Or, pour Teissier, ce sont les « recherches expérimentales »[5] qui ont permis cette interprétation et donc cette légitimation sur le tard.

Teissier termine son exposé en montrant la pertinence biologique qu'il y a à prendre en compte les changements soudains qui peuvent intervenir dans les valeurs des coefficients de l'exponentielle. Les données expérimentales montrent en effet des ruptures de pente qui font qu'on ne peut conserver ces coefficients constants tout au long de la vie d'un animal en croissance. Mais cette fragmentation de la formule mathématique en plusieurs segments de courbe, sur lesquels elle reste donc localement valable, ne doit pas être considérée comme un échec de la loi d'allométrie mais tout au contraire comme un nouveau signe de sa profonde légitimité. Selon Teissier, il faut simplement rapporter ces « singularités » ou ces « discontinuités » mathématiques aux *discontinuités qualitatives* des phases de la croissance, bien connues des biologistes par ailleurs. Dans l'article de 1936, pour bien se faire comprendre, il indique même un rapprochement avec les changements de phase en physique[6]. La « loi quantitative » de la croissance doit donc être elle-même morcelée pour épouser les discontinuités biologiques dans le temps. Il n'y a donc pas de formulation quantitative unique valant pour tout le processus de croissance. Mais Teissier n'y voit aucun inconvénient puisqu'il est physiologiquement compréhensible que, la nature des organes changeant, la relativité des croissances change aussi. Ce fait que signale Teissier est d'importance. Il indique que la mathématisation intégrale de la croissance organique au moyen

[1] [Teissier, G., 1937], p. 24. Teissier reconnaît dans cette page l'antériorité de la formulation de Huxley (1924) et rappelle que ce n'est qu'en 1936 que le nom d'« allométrie » a été adopté. D'autres scientifiques l'avaient formulée indépendamment, dont deux chercheurs que cite Teissier : Brody et Nomura. *Ibid.* Voir également [Givernaud, N., 1999] et [Gayon, J., 2000].
[2] [Teissier, G., 1937], p. 26.
[3] [Teissier, G., 1937], p. 26.
[4] [Teissier, G., 1937], p. 26.
[5] [Teissier, G., 1937], p. 26.
[6] « Il ne serait pas beaucoup plus raisonnable de vouloir qu'une formule unique puisse s'appliquer à la totalité d'un processus aussi compliqué que la croissance que de vouloir qu'une même loi de dilatation puisse convenir aux états solides, liquide et gazeux d'un même corps », [Teissier, G., 1936], p. 80.

d'une seule formule figée paraît de toute façon impossible du fait du changement de la *nature* du substrat, et donc de ses paramètres de croissance, au cours même de la croissance.

En revanche, et par ailleurs, si l'on prend en compte les « croissances biochimiques », c'est-à-dire les croissances en masse des constituants organiques (eau, poids sec total, constituants protéiques, graisses totales, azote, phosphore, etc.) et plus seulement des organes, Teissier rappelle qu'on obtient une loi de même forme que la loi d'allométrie. Cela pourrait sembler être une confirmation physiologique supplémentaire. Mais comme cette croissance biochimique ne peut être rapportée à un processus simple identique à celui d'une *nutrition* commune auprès d'une même source (ce qui avait permis à Teissier de produire une construction mathématique *et* physiologiquement signifiante de la loi d'allométrie, et donc de montrer sa légitimité pour la croissance en masse des organes), mais, qu'au contraire, elle recouvre des processus d'une extrême complexité à son échelle chimique, on ne doit pas considérer là aussi que l'on a plus qu'une simple légitimation formelle, selon Teissier[1]. La formulation allométrique de la croissance biochimique reste donc un schéma commode en attente de légitimation biochimique : « ce n'est que lorsque nous aurons réussi à traduire tous ces processus dans un système d'hypothèses acceptables que nous pourrons tenter de donner un schéma mécaniste de la croissance biochimique »[2]. Il faut donc se contenter pour l'heure de l'« interprétation formelle » passablement finaliste et reposant sur le fait que c'est la formulation la plus simple pour des croissances hétérogènes. Notons bien que, selon Teissier, l'allométrie pour la croissance biochimique n'est donc pas dépourvue de toute interprétation puisqu'elle dispose au moins d'une interprétation formelle. À titre de bilan et pour finir sur ce point, nous pouvons donc dire que Teissier connaît trois statuts différents pour une « loi quantitative » en biologie. Elle peut être :

1) Complètement interprétée, car interprétée à l'échelle des objets et au niveau des processus qu'elle décrit (biologique, physiologique, chimique…), ce qui signifie encore qu'elle est « légitimée ». Exemple : la croissance physiologique, reposant sur des processus physiologiques (de nutrition, etc.), dispose d'une loi totalement interprétée, la loi d'allométrie.
2) Formellement donc partiellement interprétée : quand la construction de la loi idéalise indûment les éléments entrant en jeu. Exemple 1 : l'interprétation populationnelle de la croissance des métazoaires chez Robertson. Exemple 2 : le schéma rationnel de Bertalanffy, ininterprétable dans le détail biologique. Exemple 3 : la légitimation de l'allométrie des croissances biochimiques par l'argument de la simplicité formelle des processus biologiques (relent de finalisme résiduel[3]).
3) Aucunement interprétée. Schéma vide. Exemple 1 : l'interprétation chimique de la loi de croissance des organismes complexes. Exemple 2 : une hypothétique interprétation par le modèle « nutritif » de l'allométrie des croissances biochimiques. Dans ce cas-là, il faut ne conserver à cette loi qu'un rôle pratique sans prétendre l'avoir interprétée.

[1] [Teissier, G., 1937], p. 36.
[2] [Teissier, G., 1937], p. 36.
[3] Le terme de « finalisme » n'est pas employé dans ce contexte par Teissier. Nous nous permettons d'interpréter ici le texte dans la mesure où, comme Marcel Prenant, Teissier considère par ailleurs que la science biologique est aux prises avec un processus dialectique, c'est-à-dire de contradiction, spécifiquement entre le mécanisme naïf et le finalisme, qui ni l'un ni l'autre n'ont de vision totalement convenable du phénomène de la vie. Voir plus bas, notre évocation de son article de 1946.

Avant d'en finir avec cette épistémologie des lois de la croissance, il nous est possible de revenir sur le sens de ce contournement, chez Teissier, de ce que nous avions appelé l'obstacle de la complexification des traductions mathématiques.

Signification épistémologique du passage à l'allométrie

Nous pensons en effet que le passage aux lois de la croissance relative, même si son récit en est ici grandement reconstruit et passablement défiguré, constitue un moment important et révélateur d'un glissement épistémologique dans l'histoire contemporaine de la mathématisation des phénomènes de croissance et de forme. De façon remarquable, Teissier parvient bien à une loi quantitative valant à l'échelle de l'organisme. Mais il faut déjà noter que c'est parce qu'il demande explicitement à cet organisme d'analyser et de mesurer *lui-même* sa propre croissance. La loi ne peut plus se présenter comme l'expression d'une propriété physiologique (auparavant quantifiée : le poids) en fonction d'une variable qui, elle, resterait de nature non intrinsèquement physiologique : le temps. Cela, c'est ce que l'on appelle une « croissance absolue ». Mais ce rapport entre physiologique et non physiologique n'est mathématiquement exprimable que pour les phénomènes simples, à la limite du physiologique et du non-physiologique. Mais lorsque la différenciation cellulaire puis organique devient importante, il n'y a qu'une fonction physiologique pour mesurer une autre fonction physiologique. C'est un des problèmes majeurs de la formalisation de la morphogenèse. Or, observons que le schéma que propose la loi d'allométrie pour les masses organiques n'est en ce sens pas réducteur : il ne s'agit justement pas d'une réduction du physiologique au physico-chimique. Et pourtant Teissier se trouve alors tout à fait comblé puisqu'il dispose de ce qu'il appelle une « interprétation physiologique ». Cela lui permet de ne pas suivre Huxley lorsque celui-ci accepte que certains paramètres de la loi soient arbitraires et n'aient aucun sens biologique. La loi mathématique n'est donc plus empirique ou phénoménologique pour Teissier à partir du moment où elle intègre dans sa formulation des paramètres et des variables qui ont *tous* un sens physiologique. La recherche de légitimation peut donc s'arrêter là pour le biologiste et le morphologiste.

Cette épistémologie ne serait pas tellement étonnante s'il n'y avait donc ce voile obscurcissant maintenu sur le processus physiologique de nutrition autour de quoi tout tourne finalement, dans cette loi de croissance relative. La fonction physiologique de nutrition (contenant aussi l'entretien, l'excrétion, l'inhibition…) qui se fragmente, on le suppose, en une myriade de sous-processus à mesure que l'on se rapproche des mammifères, n'est nullement explicitée. Elle n'est en elle-même pas clarifiée, même au moyen d'une représentation verbale ou qualitative antérieure. C'est grâce à la désignation et en même temps à l'effacement de cette fonction physiologique très complexe que, par les calculs, la loi quantitative peut retrouver une forme simple. C'est cela qu'opère au fond la mesure du physiologique par lui-même. Mais, on pourrait considérer que l'usage nominal de cette fonction physiologique, devenue entre-temps complexe, reste encore le lieu d'obscurités non seulement mathématiques mais aussi physiologiques. La complexité n'est que déplacée, de ce point de vue. Mais Teissier la proclame annulée en quelque sorte, et précisément parce que cette fonction complexe reste de part en part physiologique : donc, pour lui, on n'a pas changé de niveau d'explication mais on a réduit la complexité. Selon notre tableau récapitulatif, on a bien en effet une loi qui peut se dire totalement interprétée selon les critères de Teissier. Mais il faut comprendre qu'il n'y a d'interprétation physiologique de la loi d'allométrie que parce que Teissier *décide* d'une part de regrouper sous le nom d'une variable éphémère un tissu de processus physiologiques très complexes et d'autre part de considérer que

ce tissu est, encore à son échelle, assimilable donc homogène à une simple fonction physiologique. On voit donc que cette théorie de l'« interprétation » ménage tout de même encore des zones d'obscurités. Il ne nous revient pas bien sûr de la juger et d'en décider. Mais qu'il nous suffise d'avoir désigné cette obscurité pour nous ouvrir à la compréhension du fait que d'autres points de vue épistémologiques étaient en principe possibles, à la même époque, comme cela se confirmera d'ailleurs par la suite.

Prenant et Teissier : un physiologisme dialectique

Au sujet de Georges Teissier, il nous est nécessaire de rappeler encore quelles sont les positions épistémologiques et philosophiques qu'il affiche cette fois-ci explicitement, notamment en 1946, dans son article « Matérialisme dialectique et biologie »[1]. En effet, ce sont essentiellement ces positions qui, les premières en France, autorisent et légitiment l'adoption de l'approche par modèles, à une époque où les biologistes et les physiologistes, dans un esprit proche de celui de Claude Bernard, résistent encore massivement à la modélisation statistique[2].

Pendant la seconde guerre mondiale, Teissier s'illustre à un haut niveau dans la résistance française contre l'occupant. Par la suite, en prenant de hautes responsabilités administratives au CNRS, tout en devenant professeur à la Sorbonne, il se rapproche également de plus en plus publiquement des thèses du matérialisme dialectique. Ainsi, dans cet article de 1946, paru dans les « Cours de philosophie de l'université nouvelle », exprime-t-il son total ralliement à la doctrine du vivant et de la biologie professée par Joseph Staline. Il ne faut pas oublier que la date de cet article peut en partie expliquer le ton enthousiaste de Teissier à l'égard des idées de Staline, surtout dans le contexte français de la Libération. Nous nous gardons donc de le lire comme le signe d'un simple conditionnement de l'épistémologie par une vision politique déterminée. Même si on peut bien sûr l'analyser sous divers angles d'attaque, ce qui nous intéresse ici, c'est uniquement la façon dont Teissier arrive, sur le tard, à relier ses considérations épistémologiques et de terrain à quelque chose qui, après guerre, se développe davantage comme une vision du monde, voire comme une ontologie, plutôt que comme une simple adhésion politique. Cette vision du monde nous intéresse au plus haut point, car elle détermine elle-même fortement le sens à donner aux formalisations du vivant.

Mais rappelons d'abord que, dans ce genre épistémologique, Teissier n'innove pas. On sait combien, avant guerre, Marcel Prenant (1893-1983)[3], le zoologue, écologue des faunes marines (il avait précédé Teissier à la station de Roscoff) et professeur à la Sorbonne, avait déjà tenté de rapprocher systématiquement l'objet et les méthodes de la biologie du marxisme léninisme et du matérialisme dialectique. Prenant avait notamment déjà souligné l'idée que le matérialisme dialectique n'est pas une méthode qui s'applique de l'extérieur à la science et vient lui dire d'autorité comment agir : le matérialisme dialectique est la science elle-même et, en particulier, il

[1] [Teissier, G., 1946].

[2] Au sujet de l'influence des idées de Claude Bernard sur le front de résistance qui est opposé à l'approche statistique en biologie, voir [Giegerenzer, G. *et al*., 1989, 1997], pp. 126-130. Voir également [Burian, R. M. et Gayon, J., 1990].

[3] Marcel Prenant, inscrit au PCF dès 1920, date de création du parti, eut un grand poids tant dans la vie politique que scientifique française. Professeur à la Sorbonne dès 1928, il prend position énergiquement en faveur du marxisme. Il s'illustre ensuite dans la résistance et devient chef d'état-major des FTP d'avril 1942 à janvier 1944. À cette date, il est alors arrêté par la Gestapo et déporté à Neuengamme. Et c'est Teissier qui prend son poste au FTP. En 1945, il est élu membre du comité central du PCF. Après avoir refusé de créditer totalement les thèses de Lyssenko (bien qu'il ait essayé de tempérer le débat), il entre en conflit avec la direction du PCF. Il est exclu du Comité central pour cette raison en 1950. Il quitte enfin le PCF en 1958 pour désaccord avec la "politique algérienne" du parti. Pour ces points d'histoire et de biographie, voir [Lecourt, D., 1976, 1995], pp. 30-32 et [Monferran, J.-P., 1998].

est la biologie[1]. L'argument-clé de Prenant, repris tel quel par Teissier[2], remonte lui-même à certaines phrases de Engels que Prenant avait lues dans l'*Anti-Dühring* et dans *Dialectique de la nature*. Nous voudrions montrer que cet argument galvaudé peut prendre en effet un poids considérable et une force renouvelée auprès d'un physiologiste des années 1930 et des années 1940, au vu des avancées de la physiologie.

Il y a en effet comme une cohérence nouvelle qui s'offre à celui qui relie Engels, notamment au regard des enjeux scientifiques nouveaux et des perspectives épistémologiques de terrain de l'époque. L'argument en ressort renforcé et il n'est pas loin d'ouvrir la voie à une ontologie dialectique, moyennant certes de petites adaptations. Cet argument tourne principalement autour de la notion de métabolisme, objet d'étude central de la physiologie. Prenant cite ainsi Engels : « L'échange de substances organiques est le phénomène le plus général et le plus caractéristique de la vie… »[3] Mais cet échange lui-même préside à un fait bien étrange. Par le processus d'assimilation, le corps vivant devient un autre tout en restant le même : il est donc *à la fois* lui-même et non lui-même[4]. Remarquons que Prenant ne dit pas : « et non *autre chose* que lui-même ». Dans le corps vivant, il n'y a donc pas simplement *contrariété*, ou *altération*, il y a plus : il y a une *contradiction* tout à la fois intrinsèque et définitionnelle. C'est précisément là que la dialectique, entendue comme théorie de la contradiction, peut très naturellement sembler être la thèse philosophique et ontologique qui consonne le mieux avec la vision physiologique du monde des vivants, aussi bien pour Teissier que pour Prenant. C'est donc une sorte de « physiologisme dialectique » que propose ici Prenant, dès 1935. Sans prétendre que l'on peut tout expliquer ainsi, nous pouvons tout de même suggérer que Prenant se sent d'autant plus armé pour soutenir la vision marxiste qu'elle lui semble correspondre trait pour trait à la perspective scientifique et épistémologique qu'il adopte pour sa part devant son objet d'étude.

Prenant en rajoute même. Engels parlait encore de simples « corps albuminoïdes » pour désigner les constituants des vivants, alors qu'il faudrait aujourd'hui parler de la complexion du « protoplasme ». Il en conclut que « la biologie moderne, avec sa conception complexe du protoplasme, est plus dialectique que ne le prévoyait Engels »[5]. L'argument est donc plus vrai encore qu'à l'époque de Engels. La nature vivante est encore plus intrinsèquement dialectique pour la biologie de Prenant et Teissier que pour celle de Engels. Il y a mieux : Prenant trouve dans Engels de quoi soutenir l'idée que l'étude de la morphologie des vivants est inséparable de l'étude de leur physiologie. L'une et l'autre se conditionnent en un processus dialectique étroit :

« Toute la nature organique prouve sans arrêt que forme et contenu sont identiques ou inséparables. Les phénomènes morphologiques et physiologiques, la forme et la fonction sont des conditions mutuelles. »[6]

Il n'y a pas jusqu'aux métamorphoses intervenant dans le développement organique et la croissance des êtres vivants qui ne correspondent à quelque chose dans la théorie dialectique :

---

[1] « Le but de ce livre est de montrer, par l'exemple de la biologie tout au moins, que le matérialisme dialectique ne saurait être tyrannique pour la science, parce qu'il est la science elle-même, prolongée sans rupture, à l'aide de ses méthodes expérimentales, mais avec la volonté de ne reculer devant aucune de ses propres conséquences », [Prenant, M., 1935], p. 8.
[2] [Teissier, G., 1946], p. 1.
[3] Extrait tiré de l'*Anti-Dühring* par [Prenant, M., 1935], p. 241.
[4] « Le caractères des êtres vivants est donc d'être à la fois eux-mêmes et non eux-mêmes », [Prenant, M., 1935], p. 242.
[5] [Prenant, M., 1935], p. 243.
[6] Extrait tiré de *Dialectique de la nature* de Engels, cité par [Prenant, M., 1935], p. 244.

les moments de « crises »[1], de dépassements, succédant au moment de contradictions intrinsèques.

Mais comme le rappelle Teissier, à l'occasion de sa reprise point par point du fameux texte de Staline sur la science du vivant[2], il n'y a pas que l'objet d'étude de la biologie qui confirme les visions du matérialisme dialectique. Il y a aussi la *méthode biologique*, plus spécifiquement biométrique. Avec Prenant, la physiologie confirmait Engels, avec Teissier, la biométrie va confirmer Staline. Car, en lisant ce texte, il lui apparaît que le combat qu'il mène, depuis longtemps comme nous l'avons vu, contre les schémas « étroitement 'mécanicistes' »[3] s'identifie tout à fait avec le combat que menèrent Engels puis, bien plus tard, Lénine[4] et enfin Staline lui-même, contre le matérialisme métaphysique, ce qu'il appelait, en 1937, le « mécanicisme naïf ». En effet, le biométricien, sensible par définition même à la variabilité, se trouve en pays de connaissance lorsqu'un dialecticien lui dit que « le vivant est mouvant par essence »[5]. Dans ce texte de Teissier, il est frappant de voir combien l'appel à la reconnaissance de la complexité du vivant finit donc par s'identifier avec un appel à la reconnaissance de la nature dialectique du monde vivant. Teissier a donc progressivement mis son combat épistémologique initial au diapason d'une posture philosophique et politique :

« *[Les mécanicistes] ont cru, par une aberration étrange, que le monde vivant essentiellement mouvant par nature, pouvait se laisser enfermer dans un carcan rigide, fait de concepts abstraits empruntés sans précaution à des modèles physicochimiques outrageusement simplifiés […] Les mécanicistes ont trop souvent simplifié l'être vivant au point de n'en faire qu'une caricature et une mauvaise caricature. Ce qu'il convient d'étudier ce n'est pourtant pas un schéma théorique, plus ou moins bien fait, de l'être vivant, mais l'être vivant lui-même dans sa complexité et dans ses liaisons avec le reste du monde.* »[6]

Il faut remarquer combien cette lutte épistémologique déplacée sur le terrain philosophique et politique (et dont nous ne prétendrons pas dire laquelle a conditionné l'autre, quand bien même cette question aurait un sens) déplace elle-même la dialectique habituelle entre mécanisme et finalisme, vers une dialectique inédite et conforme aux problèmes nouveaux que pose la mathématisation récente de la biologie. Car même si Tessier se réfère encore au début de l'article à cette vieille et récurrente dialectique, il en sort en proclamant que la science doit certes être matérialiste mais pour une raison essentiellement épistémologique : le scientifique doit refuser le finalisme car, pour mener à bien son activité de connaissance, il doit croire que la matière est intelligible et « qu'aucune légalité surnaturelle ne se superpose à la légalité naturelle »[7]. C'est là un cas de conditionnement de l'ontologie par l'épistémologie. Ayant donc fait tendre auparavant la dialectique mécanisme/finalisme, d'un lieu de questionnement ontologique qu'elle occupait le plus souvent, vers une question épistémologique, le déplacement de sa propre problématique épistémologique vers l'ontologie du matérialisme dialectique s'en trouve à son tour facilité. Avec Teissier, c'est dans un horizon épistémologique que le matérialisme dialectique devient un physiologisme dialectique. Il est alors apte à postuler tout à la fois la « complexité » et le caractère

[1] [Prenant, M., 1935], p. 244.
[2] Paru dans le chapitre IV de l'*Histoire du Parti Communiste de l'URSS* ; référence donnée par [Teissier, G., 1946], p. 2.
[3] [Teissier, G., 1946], p. 8. On pense à Loeb ici.
[4] Dans *Matérialisme et empiriocriticisme.* Voir [Lénine, V. I., 1908, 1973].
[5] [Teissier, G., 1946], p. 8.
[6] [Teissier, G., 1946], p. 8.
[7] [Teissier, G., 1946], p. 7.

« mouvant » du vivant. Les schémas abstraits sont à rejeter pour Teissier car ils sont toujours trop figés et manquent de cette contradiction interne qui fait le mouvement et la vie. Ce sont essentiellement les flux de matières qui, dans leur complexité physiologique, échappent toujours d'une manière ou d'une autre aux carcans rigides qu'on veut leur imposer. Il est cependant possible d'avoir des schémas mathématiques qui épousent au mieux cette variabilité du vivant, dans les limites de la variabilité statistique bien évidemment. On dispose alors d'une véritable interprétation physiologique de la loi mathématique. Mais ces schémas eux-mêmes finissent par échouer devant la dialectique irrépressible du vivant : car même s'ils sont physiologiquement interprétés, ils ne valent jamais que localement.

Dans les processus de croissance du vivant, selon Teissier, et cela est important à souligner, *il n'y a pas de schéma théorique et mathématique global*. Il ne faut même pas le chercher[1] car la possibilité d'interpréter physiologiquement la loi mathématique est dans une certaine mesure incompatible avec sa généralité. Comme, de surcroît, c'est la dialectique même du vivant qui commande ce principe d'incertitude de la biologie mathématique, on ne saurait s'attendre à ce qu'il disparaisse un jour. La dialectique de l'expérience et de la théorie est là, en tout cas, pour sortir le biologiste de ces impasses inévitables et périodiques, mais sans qu'elle puisse jamais l'en délivrer totalement.

Bilan : loi hypothétique et mesures relatives

Au vu des propositions du statisticien anglais Fisher comme de celles du physiologiste et biométricien français Teissier, la considération des caractères morphologiques et de leur croissance au cours du temps imposerait donc désormais une approche hypothétique et fictive pour l'un, relative pour l'autre. Certes, les raisons pour lesquelles l'un et l'autre s'engagent dans ce déracinement des formalismes sont très différentes d'un point de vue technique comme d'un point de vue épistémologique. Il y a cependant une consonance remarquable dans ce renoncement à faire exprimer au formalisme la teneur même du phénomène à décrire.

En ce qui concerne Teissier, on ne peut pas considérer qu'il se livre à des modèles mathématiques dans le même sens que les anglo-saxons. Chez lui, les mathématiques descriptives et les techniques de la biométrie (réduction de variance) servent le côté expérimental tandis que les mathématiques analytiques servent la formulation théorique des « lois fonctionnelles ». Ce partage des tâches et cette mathématisation sont nés au départ d'une réaction au mécanicisme de certains embryologistes américains. À l'époque encore, Teissier ne veut entendre par ce terme de « modèle » que ce qu'il exècre le plus, précisément sous la forme des « modèles mécaniques » de l'ingénieur, ces « modèles » ne renvoyant que trop au spectre du matérialisme métaphysique et idéologique. Pourtant, avec la loi d'allométrie, il admet une sorte de formalisation transversale qui est légitimée de manière originale par sa lecture dialectique du monde vivant. À un certain niveau, physiologique en l'occurrence, on peut selon lui opposer des formules à des formules, des signes à des signes ; on peut demeurer et se mouvoir quelque temps dans le pur élément du langage et de la formule mathématique, sans chercher tout de suite à interpréter ce modèle discursif (ou « dialectique » comme le dira Couffignal en manière de *lapsus*) par un référent ou par un sens biologique. Son « physiologisme dialectique » présente ainsi

[1] « On devra, beaucoup plus encore pour des raisons biologiques que pour des motifs pratiques, chercher une loi distincte pour chacune d'entre elles [les étapes de la croissance], et il sera tout à fait inutile de se préoccuper des valeurs que peuvent prendre les fonctions utilisées en dehors des limites entre lesquelles elles ont été reconnues valables », [Teissier, G., 1936], p. 80.

l'immense avantage de lui permettre de postuler la nature linguistique du vivant sans pour autant le condamner à l'enfer des nominalismes et autres positivismes qui restent pour lui autant de fétichismes de la formule ininterprétée et fictive. Une telle légitimation « continentale » (au sens où l'on a longtemps parlé de « philosophie continentale » pour l'opposer à la philosophie anglo-saxonne, néo-positiviste ou analytique) de la méthode des modèles contribuera d'une façon décisive à faire accepter cette méthode plus largement dans les milieux de la biologie et de l'agronomie françaises. Il nous sera d'autant plus instructif, par la suite, de voir comment ce contexte français pourra se plier à la « méthode des modèles » dans l'après guerre au point de la revendiquer ouvertement, notamment dans le cas précis de la forme des plantes : cette large assimilation nécessitera d'autres réaménagements épistémologiques de poids, tout en maintenant certaines visions ontologiques traditionnelles et bien implantées.

En ce qui concerne les modèles statistiques plus particulièrement, il faut préciser que, dans les années 1910, cet esprit de la biométrie hérité des problématiques darwiniennes souffle assez majoritairement en botanique, notamment en Grande-Bretagne. La morphologie quantitative telle que les botanistes la conçoivent est en effet une morphologie statistique, descriptive et comparative. Elle a pour fonction essentielle de servir à des problématiques de phylogenèse[1]. On considère ainsi qu'une ressemblance morphologique est l'indice d'une affinité génétique forte. Il serait alors possible de reconstituer par là l'arbre phylogénétique. Mais pourtant, un certain nombre d'observations indiquait déjà que des caractéristiques structurelles comparables pouvaient être présentes dans des plantes n'ayant aucune affinité du point de vue de la taxonomie. Il y avait donc un problème de cohérence : l'approche morphométrique extrayait-elle les caractères vraiment décisifs pour la morphologie de la plante ? Dans les années 1920, dans un contexte surtout anglo-saxon, on voit alors renaître un intérêt pour une morphologie causale, c'est-à-dire pour une morphologie sensible au processus de développement lui-même à l'échelle de l'individu[2]. Et c'est précisément en lien avec ce contexte que se fait jour une certaine résistance à l'approche modélisante telle que nous l'avons exposée jusqu'à présent pour la morphologie.

[1] Voir [Wardlaw, C. W., 1968], p. 95.
[2] Voir [Wardlaw, C. W., 1968], p. 4.

CHAPITRE 3 – La bio-« mécanique » de d'Arcy Thompson (1917-1942)

Il serait faux en effet de dire que la modélisation statistique (la « loi hypothétique » de Fisher) satisfait immédiatement et convainc l'ensemble des biologistes concernés par la représentation mathématique des plantes. En fait, beaucoup de chercheurs vont longtemps lui résister dans la mesure même où ils ne se sentent pas concernés par les mêmes problématiques que les agronomes ou que les généticiens intéressés à la quantification morphométrique transindividuelle. Toutefois, ce à quoi nous devons être attentif ici, c'est que le « modèle statistique » ne va pas d'abord être confronté à d'autres types de « modèles mathématiques », de nature déterministe par exemple. Il va dans un premier temps se voir opposer des construits formels au statut épistémique tout à fait différent, à savoir des « théories physicalistes » et des « axiomatiques formelles ». Il n' y a donc pas là de dialectique cohérente autour de différents « styles » de formalisation et à l'intérieur d'une épistémologie par ailleurs commune. Il s'agit bien comme nous allons essayer de le comprendre, d'un refus de l'idée de modèle en tant que telle. À l'époque, en ce qui concerne les problématiques de morphogenèse, il lui est opposé des théories, non d'autres styles de modèles.

Avec des chercheurs comme le zoologiste d'Arcy Wentworth Thompson (1860-1948) ou le biophysicien Nicholas Rashevsky (1899-1972), on assiste en effet clairement à une volonté commune de faire front contre les interprétations probabilistes et modélistes de la morphogenèse. C'est-à-dire qu'il va encore s'agir pour eux de s'expliquer et de se donner à voir la construction du résultat (la forme) à partir d'événements élémentaires intervenant dans un scénario de type essentiellement mécanique. Il ne faudrait pas ici être victime d'une illusion rétrospective qui consisterait à les penser d'emblée comme des modélisateurs alternatifs : ils ne proposent pas des modèles mécaniques à proprement parler. De leur propre point de vue, l'alternative n'est pas encore à faire entre un modèle statistique et un modèle déterministe, mais elle est d'abord à faire entre une fiction formalisant l'aléatoire, et donc quelque chose qu'ils perçoivent comme le voile d'une ignorance, et une authentique théorisation enracinée dans le substrat réel, ce dernier ne pouvant d'abord être conçu, selon eux, que sous l'espèce du substrat physique qui se trouve avantageusement mathématisé par ailleurs, à savoir en mécanique et en physique.

Le développement des théorisations physicalistes de la morphogenèse

Avec le terme « physicaliste » ou l'expression « approche physicomathématique », nous entendons désigner une série de recherches qui se sont attachées, à partir de la fin des années 1910, à mettre au jour des explications statiques ou dynamiques aux phénomènes de forme et cela en recourant à des scénarios de nature essentiellement mécanique et physique. Pour se mathématiser, la première biologie mathématique axée sur les formes a ainsi tâché de suivre la voie de ses ancêtres déjà partiellement mathématisées qu'étaient la physiologie, l'électrophysiologie, la neurophysiologie ou la biochimie.

Comme ces disciplines plus anciennes, l'approche mathématisée des structures macroscopiques et spatiales du vivant a donc d'abord puisé ses scénarios formels et explicatifs dans les divers domaines de la physique mathématique, mais avec pourtant moins de conviction que ses voisines. Il faut sans doute attribuer ce piétinement de la morphologie, et de l'embryologie quantitative physicaliste plus spécifiquement, à ce que Nicholas Rashevsky appellera le

« caractère insaisissable » des phénomènes étudiés en ces matières[1]. Malgré le fait qu'ils semblent se découper aisément sur un fond et que l'on puisse ainsi les dessiner, les phénomènes de forme semblent en effet échapper à toute mathématisation élémentaire comme à toute mesure triviale. Le dessin d'une plante semble encore exiger les dons artistiques d'un portraitiste qui sait capter la singularité de la forme mais pas son universalité. Ce n'est donc pas seulement les caractères par ailleurs bien connus en biologie générale et en biométrie de la faible reproductibilité des expériences sur le vivant et de la grande diversité des facteurs qui font ici particulièrement obstacle : il manque tout à la fois des outils descriptifs formalisés véritablement adaptés ainsi qu'une réelle prise empirique sur les phénomènes morphologiques. Ces outils descriptifs devraient également pouvoir s'inscrire dans des systèmes formels déductifs. C'est du moins ce que les tenants d'une biologie théorique attendent dans ce domaine.

Le défaut du côté de l'expérimentation est, pour sa part, dû à l'absence de paramètres de contrôle bien identifiés, accessibles et permettant de tester le pouvoir à tout le moins prédictif des formalisations candidates. C'est donc un défaut tant du côté de l'expérimentation que du côté de la théorie formalisée.

À part les premières tentatives de la phyllotaxie que nous avons évoquées, on ne sait donc pas précisément par quel abord, c'est-à-dire dans quelle langue formelle et avec quels instruments, rendre compte des phénomènes morphologiques. Il n'est donc pas surprenant que les approches aient d'abord été très théoriques et qualitatives c'est-à-dire éloignées de l'expérimentation mesurable et donc peu soucieuse de validations empiriques et quantifiées.

Les postulats de d'Arcy Thompson sur le « pouvoir » des mathématiques.

L'approche délibérément éthérée, admirative, spéculative, voire pythagoricienne[2], de d'Arcy Thompson (1860-1948) a souvent été conçue comme une curiosité parce que s'inscrivant nettement en déphasage avec les travaux plus physiologiques et surtout plus statistiques de son temps[3]. D'Arcy Thompson est ainsi connu pour avoir rappelé, contre la vision qu'il jugeait en son temps trop exclusivement axée sur l'explication « facile »[4] par la sélection naturelle, la pertinence

[1] Voir [Rashevsky, N., 1938, 1948], p. 241. Au vu de la bibliographie, ce chapitre sans date semble remonter à 1940 ou 1941. Rashevsky s'y exprime ainsi au sujet de l'embryologie quantitative qu'il appelle par ailleurs de ses vœux : "The quantitative element is still almost completely lacking in experimental researches, and this seems to be due not so much to a lack of effort on the part of the experimenter to introduce quantitative measurements as to the elusive character of the phenomena studied, which make it almost impossible to point out *where* and *how* any quantitative method can be applied and *what* actually can be measured." C'est nous qui soulignons. Selon Rashevsky, on ne sait donc ni où, ni comment ni quoi mesurer exactement en morphologie quantitative.

[2] « Ce ne sont pas seulement les mouvements des hôtes de la voûte céleste qui doivent être déterminés par l'observation, et élucidés par la voie des mathématiques, mais également tout ce qui peut s'exprimer par des nombres et être défini par une loi naturelle. C'est l'enseignement de Platon et de Pythagore, le message de la sagesse grecque à l'humanité. Ainsi, le vivant et l'inanimé, nous les occupants de ce monde, et ce monde que nous occupons, [passage en grec traduit ainsi : *et certes toutes les choses inconnues*], sommes tous soumis aux lois physiques et mathématiques », [Thompson, d'Arcy (Sir), 1917, 1961, 1994], p. 320.

[3] Voir par exemple la préface de 1961 au livre de d'Arcy Thompson écrite par Stephen Jay Gould en 1961, [Thompson, d'Arcy (Sir), 1917, 1961, 1994], p. 8. Voir également [Witkowski, N., 1998], p. 27.

[4] En pastichant et en recombinant des morceaux de phrase qu'il reprend explicitement à un passage de Francis Bacon et dans lequel ce dernier fustigeait l'excès du recours aux causes finales aux dépens des « causes physiques », d'Arcy Thompson écrit pour sa part : « Aussi longtemps que resteront ancrés des concepts tels que celui de 'variation accidentelle' et de 'survie des mieux adaptés' et que ces hypothèses de base contenteront les philosophes de la biologie, ces 'causes satisfaisantes et trompeuses' empêcheront 'une quête rigoureuse et assidue […] faisant le plus grand tort aux découvertes futures' », [Thompson, d'Arcy (Sir), 1917, 1961, 1994], p. 33. On trouve ailleurs d'autres pages visant également l'hégémonie de la théorie de l'évolution. L'argument principal de d'Arcy Thompson consiste à dire qu'il faudra bien un jour ou l'autre que le biologiste se penche sur les causes *actuelles* et *anhistoriques* de la mise en forme des vivants. En toute rigueur, on ne devrait pas prendre en compte l'historicité de ses formes, même si elle existe. Elle n'est pas déterminante : « le ptérodactyle ne volait pas moins bien que l'albatros », *ibid*., pp. 207-208.

d'une approche physico-mathématique dans les problèmes de morphogenèse. Il a en effet essentiellement eu recours, en mathématiques, à ce qu'il a appelé la théorie des transformations[1], en physique, au principe du travail minimal, pour décrire et proposer de partielles et lointaines explications pour la mise en place des formes inertes ou vivantes, cela au gré des analogies mécaniques que sa grande culture lui faisait venir à l'esprit. Comme il ne s'agit nullement ici de rendre compte de toute l'œuvre de d'Arcy Thompson, nous allons lui poser une question précise et orientée vers notre préoccupation : comment justifie-t-il ses transferts osés de méthodes mathématiques ? Or, nous verrons que répondre avec lui à cette question suppose d'abord d'expliquer comment il conçoit la causalité des phénomènes. Là est la clé de cette approche qui a pu être jugée lointaine et cavalière mais qui influencera fortement et durablement la biophysique des formes dans l'après-guerre, comme nous serons amené à la percevoir.

Cause et analogie ne sont toutes deux que des « liens » entre les phénomènes

Notons avant tout que l'horizon d'homogénéisation grâce auquel d'Arcy Thompson s'autorise ces transferts de formulations mathématiques entre différents domaines présentant des formes analogues (inertes ou vivantes) est essentiellement de nature mécanique[2]. D'Arcy Thompson essaie de rapporter les problèmes de forme à des problèmes de mouvements virtuels mais empêchés, c'est-à-dire en fait à des équilibres de force. La mécanique statique est donc ici convoquée la première pour expliquer les formes. Dans cette mathématisation, il ne s'agit donc pas d'une sorte de modélisation mathématique de type phénoménologique avant l'heure puisqu'un point de vue mécaniste semble encore prédominer. Or, pour nous faire comprendre que son mécanicisme est toutefois davantage méthodologique que réellement physicaliste et réductionniste, d'Arcy Thompson se voit en fait obligé d'affaiblir la signification du concept de « cause » matérielle en la réduisant à la simple idée, classique dans la philosophie empiriste anglaise depuis David Hume (1711-1776)[3], de lien de précession-succession ou de lien de contiguïté. Ce faisant, il rapproche significativement mais de façon décisive la relation analogique de la relation causale :

[1] Cette « théorie » est une arme contre toute tentative de réduction du problème des formes aux seuls hasards de la sélection naturelle. Elle vise à rendre compte rigoureusement des surprenantes parentés de formes entre des espèces génétiquement éloignées : ce qui prouverait que la sélection naturelle, ayant eu à inventer *plusieurs fois* la même forme globale, reste fortement contrainte par la physique des corps et les problèmes *physiques et mécaniques* que leur structure a à résoudre. Cette « théorie » consiste à représenter géométriquement les déformations continues du réseau de coordonnées (dans un repère cartésien classique) correspondant à la déformation d'une forme naturelle typique (ex : un type de feuille ou un type de poisson) en une forme d'un autre type voire d'une autre espèce. Voir [Thompson, d'Arcy (Sir), 1917, 1961, 1994], chapitre 9. Les déformations des êtres y sont donc *désincarnées* et *déplacées* sur autre chose. Elles sont en effet géométriquement représentées par les seules transformations correspondantes des systèmes de coordonnées (coordonnées curvilignes). Cette théorie reste analogique et de surface puisqu'elle n'est pas réellement soutenue pas des scénarios explicatifs mécanistes autres que ceux qui font intervenir une force virtuelle de pression ou d'extension, c'est-à-dire finalement l'idée que c'est « comme si » l'on avait étiré tel poisson pour le faire devenir tel autre, etc. Un autre argument que peut employer d'Arcy Thompson çà et là dans son ouvrage reste nettement spéculatif puisqu'il reprend en fait l'idée goethéenne séduisante de modèle primitif diversement étiré et métamorphosé.

[2] « Les problèmes de forme de la matière vivante sont avant tout des problèmes mathématiques et leurs problèmes de croissance sont des problèmes de physique ; de ce fait le morphologiste ne peut se définir que comme un étudiant en sciences physiques », [Thompson, d'Arcy (Sir), 1917, 1961, 1994], p. 35 ; « … du concept de forme, nous nous hissons vers la compréhension des forces qui lui ont donné naissance », [Thompson, d'Arcy (Sir), 1917, 1961, 1994], p. 268.

[3] Voir [Hume, D., 1748, 1983], section IV.

« En tant qu'étudiant en sciences mathématiques et en physique expérimentale, nous nous satisfaisons de traiter les antécédents ou les phénomènes proches de ceux qui nous intéressent[1]*, et sans lesquels ces phénomènes n'existeraient pas : en résumé, nous nous contentons des causes qui ne sont rien d'autre que des conditions* sine qua non*, ou encore [phrase en latin traduite] des causes rattachées les unes aux autres et enchaînées par un lien*[2] *nécessaire. »*[3]

Cette absorption du causal par l'analogique est entérinée par d'Arcy Thompson dans la mesure où la mécanique rationnelle de Newton elle-même ne lui semble pas avoir déployé autre chose. Il n'y a donc pas pour lui de rupture dans la méthode de la science moderne. Et c'est poursuivre le projet de Galilée, Bacon ou Newton que de tenter de décrire les formes naturelles par des raisons mathématiques. Cause et analogie sont donc très proches dans la mesure où elles ne sont que des liens que la nature tisse entre ses phénomènes. Ces liens sont supposés exister réellement. Là s'arrête donc tout rapprochement avec l'empirisme sceptique de Hume. Selon d'Arcy Thompson, le mathématicien naturaliste est chargé de déceler ces liens préexistants avec l'outil d'analyse que lui sont les mathématiques. La notion de « force » ne doit d'ailleurs pas être prise au pied de la lettre : la vision de d'Arcy Thompson n'est donc pas exactement, on le voit bien, un réductionnisme mécaniste. Elle est une épistémologie de la causalité réduite à l'homologie : pour la mise en place dynamique des formes statiques, ce n'est que par défaut d'un vocabulaire encore à constituer que le terme de « force » sera analogiquement employé.

Cependant, et à l'inverse, une telle épistémologie ne mérite pas non plus tout à fait le qualificatif de « positiviste » dans la mesure où le rôle conféré *a priori* aux mathématiques dans la description de la nature reste non seulement considérable mais aussi fondé sur une foi principielle en l'harmonie de la nature. Le monde est en principe harmonieux : il n'est donc pas insignifiant que les phénomènes se répondent à travers des homologies de structure que les mathématiques sont chargées de nous dévoiler. Les mathématiques ont donc non seulement une fonction scientifique de connaissance mais aussi et surtout une fonction de dévoilement des symboles cachés bien plus encore qu'une fonction de maîtrise technique.

Combiner et généraliser : la symbolisation à double effet synthétique

Sans revenir sur les études déjà nombreuses qui ont été menées sur le sujet et sur le personnage en général, il nous est nécessaire de nous pencher ici sur un passage qui, en conséquence de la déréalisation qu'il a fait subir à la cause efficiente, déploie sans ambiguïté le

---

[1] C'est nous qui soulignons ce passage pour indiquer où exactement l'auteur insère subrepticement l'assimilation de l'analogique au causal faible.

[2] La métaphore du « nœud » (du « *nexus* » puisqu'il l'écrit aussi bien en latin qu'en anglais), du « lien », du « tissu », du « réseau » est omniprésente dans cette page pour désigner tant les rapports de causalité traditionnels de la physique moderne que les rapports analogiques qu'il prétend nous découvrir dans la suite de son ouvrage. Or, rappelons que ces métaphores du « fil » et du « lien » servent traditionnellement à désigner des obligations morales et non pas des contraintes physiques. On se sent « lié » par une obligation, un contrat, une promesse… Il n'est que de rappeler l'étymologie d'« obligation » : ce mot a été formé à partir du verbe « lier », « *ligare* » en latin. D'un côté, donc, l'« efficience physique » est assimilée à un mystère qui ne veut pas être reconnu comme tel puisque finalement les lois de Newton ne nous montrent pas la causation effective de la gravitation. Ce serait sinon pour lui « feindre des hypothèses ». Ce qu'il refuse. D'un autre côté et symétriquement, la « *ratio cognoscendi* » est revalorisée ([Thompson, d'Arcy (Sir), 1917, 1961, 1994], pp. 32-33) et jugée finalement plus claire, évidente et intuitive. C'est précisément là que se loge l'idéalisme de d'Arcy Thompson. Le matériel est conçu comme fantomatique. Mais c'est l'idéel mathématique qui est bien réel, visualisable, intuitif et de ce fait concevable. Il va au-delà de la déréalisation positiviste de la « cause » (classique depuis Comte) puisqu'il affirme en revanche le caractère plus réel de la « raison » d'être des choses, ce que n'assument cependant pas les positivistes contemporains en général.

[3] [Thompson, d'Arcy (Sir), 1917, 1961, 1994], p. 33.

rôle précis que d'Arcy Thompson entend pouvoir faire jouer aux mathématiques dans les sciences de la nature et, spécifiquement, dans leur étude des formes. Autant son approche délibérément analogique et débarrassée de tout souci de vérification expérimentale précise a pu certes trancher dans le monde de l'édition scientifique sur ces questions de morphogenèse, autant sa vision du rôle des mathématiques dans les sciences nous paraîtra finalement assez largement partagée par les biologistes théoriciens qui le suivront une bonne partie du 20ème siècle. Il nous est donc indispensable d'en rendre compte brièvement ici.

Dans son chapitre terminal sur « La théorie des transformations ou la comparaison des formes apparentées », il présente en effet trois raisons précises de recourir à des définitions mathématiques dans la description et l'explication des formes naturelles. Tout d'abord, les mathématiques servent selon lui à résumer, à produire des « symboles » donc à « économiser la pensée »[1]. C'est que l'application de mathématiques aux phénomènes naturels se fait en deux temps : descriptif puis analytique. Dans la première étape, les mathématiques sont utilisées comme un « langage » plus précis que le langage naturel. Ils viennent donc naturellement seconder ce dernier pour la description du monde. Mais le langage mathématique a de surcroît le don de se ramasser en quelque sorte sur lui-même pour s'abréger et faire de ses mots mieux que des mots, des « symboles »[2]. La description devient donc une symbolisation grâce à une propriété intrinsèque du langage descripteur second. C'est bien là le rôle que la deuxième étape de la mathématisation, dite analytique, confère aux mathématiques. La représentation mathématique est d'essence analytique mais elle conduit ce faisant à une synthèse reproductrice de type « symbolique ».

La deuxième raison que d'Arcy Thompson avance en faveur du recours à la mathématisation en sciences est résumée en cette phrase : « nous accédons par l'analyse mathématique à la synthèse mathématique »[3]. C'est-à-dire que sous l'effet de leurs symbolisations, les mathématiques n'isolent pas les phénomènes les uns des autres en les particularisant. L'analyse ne procède pas, contrairement à ce que l'on pourrait croire, à une dissection infiniment différenciante. Mais, bien au contraire, en symbolisant et en nous hissant de ce fait au général, donc en faisant fi des détails particularisant les phénomènes, les mathématiques prêtent mieux que tout autre langage à des rapprochements *cette fois-ci transversaux* entre les phénomènes. Les mathématiques nous montrent qu'il y a analogie[4] apparente parce qu'en fait il y avait d'abord homologie[5] profonde. Cette homologie, jusque là repliée et cachée sous les phénomènes, se manifeste dans l'identité formelle entre certaines

---

[1] [Thompson, d'Arcy (Sir), 1917, 1961, 1994], p. 267. Sur ce point, il faut voir là l'influence d'Henri Poincaré (plutôt que celle d'Ernst Mach) sur d'Arcy Thompson. Il citera Poincaré un peu plus bas en effet (*ibid*., p. 268).

[2] « Cette définition mathématique s'exprime en peu de mots ou plus brièvement encore, à l'aide de symboles, et ces mots et ces symboles véhiculent une telle signification qu'ils permettent d'économiser la pensée… », [Thompson, d'Arcy (Sir), 1917, 1961, 1994], p. 267.

[3] [Thompson, d'Arcy (Sir), 1917, 1961, 1994], p. 268.

[4] « Proportionnalité » en mathématiques, « Ressemblance fonctionnelle extérieure » en biologie, *in* entrée « analogie » du dictionnaire Robert-I, 1970.

[5] « Homologue : se dit des éléments qui se correspondent à l'intérieur d'ensembles différents liés par une relation », *in* entrée « homologue » du dictionnaire Robert-I, 1970. L'homologie (« homo » : « même » raison) est donc plus profonde que l'analogie (« ana » : raison « de nouveau », raison « semblable ») qui, malgré le sens originellement strict d'Aristote (« identité du rapport qui unit deux à deux les termes de deux ou plusieurs couples […] proportion mathématique », *in Vocabulaire technique et critique de la philosophie*, André Lalande, 1926, 1983, PUF, article « analogie », p. 51), a perdu, à l'usage, de sa rigueur pour ne plus désigner qu'une vague ressemblance de façade. Alors que l'analogie constate donc une similarité entre des rapports de surface affectant deux phénomènes différents, l'homologie prend acte d'une identité de raison profonde, c'est-à-dire d'une identité de fonctionnement, de conformation et de mise en forme. Cependant, l'analogie a parfois conservé le sens fort d'homologie, notamment chez certains philosophes des sciences formalistes. Assez logiquement, une approche formaliste ne permet justement plus de sentir la nuance entre les deux. Voir [Nadeau, R., 1999], article « analogie », pp. 9-11.

symbolisations. Les mathématiques *posent* donc *ensemble* divers processus analogues (littéralement, elles les « synthétisent »), car elles les représentent symboliquement de même façon. Elles décèlent ce faisant les homologies de structure. C'est une deuxième retombée, celle-ci inattendue, du recours au langage mathématique. Le symbole se retrouvant identique dans des sphères éloignées déploie une force de symbolisation non prévisible et d'un degré encore supérieur à celle qu'on lui avait donnée[1] dans son premier pouvoir synthétique. C'est en quelque sorte le symbole mathématique lui-même qui prend ici l'initiative de faire un pas de plus, de symboliser encore davantage.

C'est précisément là que d'Arcy Thompson utilise son assimilation épistémologique antérieure entre la cause et l'analogie : le lien transversal que révèle le symbole mathématique n'est finalement pas d'autre nature que le lien longitudinal qu'on lui avait d'abord demandé d'exprimer puis de symboliser dans le cas du processus gouvernant tel phénomène particulier. Dans les deux cas, il s'agit de « symbolisation » : que ce soit pour reconstituer de façon abrégée la description d'un phénomène et de son processus, ou que ce soit pour exprimer une parenté entre des phénomènes de nature différente. Si bien qu'à la limite, un phénomène pourrait aussi bien être « expliqué » par son analogue que par sa cause. C'est donc la métaphore du « réseau » qui se confirme ici pleinement, comme on le voit, puisque, comme dans un réseau ou un tissu doté d'une trame et d'une chaîne, aucune direction de détermination des phénomènes les uns par les autres n'est particulièrement privilégiée : la direction causale classique, selon l'axe du temps, ou l'analogique, selon l'ordre des coexistants.

Ainsi, il devient possible de rendre les formes mathématiques, au départ descriptives et statiques, à leur genèse dynamique supposée : la physique (science du mouvement et de ce qui est mû selon Aristote, et dont d'Arcy Thompson se réclame ici) construit en effet ces formes mathématiques au moyen du « diagramme d'équilibre des forces »[2] qui affectent tout objet matériel doué de forme. S'il y a homologie mathématique entre deux mises en forme, on peut donc être sûr qu'il y a des forces physiques de même nature qui y sont décisives. Voici donc l'approche mécaniste de d'Arcy Thompson en biologie fondée finalement sur une double doctrine de la cause comme analogie et des mathématiques comme symboles abréviatifs.

Mais c'est son troisième argument en faveur de la mathématisation en sciences qui va nous paraître le plus instructif, notamment pour ce qui concerne le devenir de la modélisation mathématique à travers la simulation numérique puis informatique dans les sciences de la forme. Voici en effet ce qu'écrit d'Arcy Thompson, en 1917, à la suite des passages précédemment évoqués :

« Il existe encore une autre manière – c'est à Henri Poincaré que nous la devons – de considérer la fonction des mathématiques, et de bien comprendre pourquoi ses lois et ses méthodes sous-tendent nécessairement la science physique tout entière. Tout phénomène naturel, si simple qu'il paraisse, est en réalité composite, et chaque action, chaque effet visible est en réalité la somme d'un nombre indéfini d'actions sous-jacentes. C'est ici que s'exprime le pouvoir tout particulier des mathématiques : celui de combiner et de généraliser*. Le concept de moyenne, l'équation d'une courbe, la description d'une mousse ou d'un tissu cellulaire, toutes ces opérations au sens large du terme, relèvent des mathématiques, car elles peuvent toutes être représentées par des sommes de phénomènes ou d'actions élémentaires. La croissance et la forme sont tout*

[1] « Nous découvrons des homologies ou des identités qui nous échappaient auparavant.. », [Thompson, d'Arcy (Sir), 1917, 1961, 1994], p. 268.
[2] [Thompson, d'Arcy (Sir), 1917, 1961, 1994], p. 268.

entières de cette nature composite ; voilà pourquoi les lois mathématiques constitueront leurs fondements et pourquoi les méthodes mathématiques seront particulièrement adaptées à leur interprétation. »[1]

On voit donc que les mathématiques sont supposées être toujours à même à la fois de généraliser et de combiner. Ce qui est vrai pour les équations différentielles, où l'on peut supposer avoir affaire à des sommes de valeurs infinitésimales, ou *a fortiori* pour les calculs de moyenne, semble donc devoir être vrai des autres formes de mathématisation à venir pour d'Arcy Thompson. Laissant de côté les détails puisqu'ils seront intégrés et comme fondus dans la sommation mathématique, d'Arcy Thompson sera donc toujours préférentiellement sensible au « type », à l'« essence »[2] du phénomène considéré. Mais quand on ne peut *mathématiser* directement et globalement, et que l'on veut néanmoins *combiner* des micro-événements hétérogènes, il semble qu'il faille renoncer à la *généralisation*. Il faudrait alors choisir : « combiner » *ou* « généraliser ». En tous les cas, c'est bien parce que, selon d'Arcy Thompson, les mathématiques peuvent souvent être utilisées[3] et peuvent en revanche toujours *à la fois* « combiner » et « généraliser » qu'elles conduisent *à la fois* à la description *et* à l'explication de la mise en place des formes spatiales en général. Telle est son hypothèse épistémologique fondamentale[4]. Et telle est la raison ultime pour laquelle il s'inscrit en faux par rapport à l'idée d'un déracinement des formalismes et des mathématiques, même pour aborder les problèmes de forme. Son épistémologie restera ainsi longtemps celle des biophysiciens qui voudront résister au déracinement et qui espéreront construire une biologie mathématisée en un sens théorique.

Mais regardons rapidement ce qu'il en est effectivement pour le domaine qui nous occupe plus particulièrement : la morphogenèse végétale. D'Arcy Thompson l'aborde çà et là. Nous évoquerons successivement les solutions qu'il préconise pour l'explication de la spirale logarithmique chez les plantes, pour la forme des feuilles et enfin pour les angles de ramification.

Le « gnomon » au principe de la spirale logarithmique : la loi géométrique la plus simple

Dans son chapitre sur « La spirale équiangle », d'Arcy Thompson fait une proposition qui innove quelque peu dans la mesure où il produit une de ses synthèses nouvelles (au sens qu'il a donné à la synthèse mathématique que l'on pourrait dire seconde : la synthèse « symbolique » entre des phénomènes disparates *via* des formulations mathématiques déjà synthétiques) fondée sur le concept de « gnomon »[5]. Il représente sous un nouveau jour ce que Schimper, Braun et les frères Bravais avaient depuis longtemps représenté de façon isolée : la génération mathématique d'une spirale logarithmique à partir de la réitération de gnomons sur une figure initiale donnée. La spirale logarithmique (ou spirale équiangle) est ainsi douée de « similitude continue »[6]. C'est le cas des inflorescences successives de la plante commune appelée bourrache : chaque pousse y

[1] [Thompson, d'Arcy (Sir), 1917, 1961, 1994], p. 268. C'est nous qui soulignons.
[2] [Thompson, d'Arcy (Sir), 1917, 1961, 1994], p. 269.
[3] D'Arcy Thompson admet que les mathématiques ne soient pas toujours utilisables et que les morphologistes se retrouvent face à des impasses, comme parfois les physiciens. Voir [Thompson, d'Arcy (Sir), 1917, 1961, 1994], pp. 269-270.
[4] Nous verrons que c'est cette opinion optimiste qui sera battue en brêche dans l'après-guerre, avec le développement des solutions de simulation informatique.
[5] Le « gnomon » est une forme géométrique qui s'ajoute à une première, et ainsi la fait croître, mais ne la fait pas pour autant changer globalement de forme. D'Arcy Thompson appelle cela la « propriété de similitude continue », [Thompson, d'Arcy (Sir), 1917, 1961, 1994], p. 188.
[6] [Thompson, d'Arcy (Sir), 1917, 1961, 1994], pp. 187 et 188.

forme un angle constant (d'où le terme « équiangle ») avec la précédente mais est de taille toujours inférieure à elle d'un même rapport. Dans ces conditions, selon d'Arcy Thompson, « chaque pousse constitue ou définit un gnomon de la structure qui la précédait »[1]. Or, si nous observons ce genre de mathématisation, nous ne pouvons pas dire qu'elle ressortisse directement à une analyse mécanique ou par les causes physiques. Elle dépend en fait d'une simple observation qui semble devoir passer pour une évidence : la spirale logarithmique bien connue est la conséquence de la loi de croissance la plus simple, une croissance des parties en proportions constantes. Et c'est elle « que la nature a choisie »[2] dit-il. D'Arcy Thompson ne propose donc pas d'explication mécanique à proprement parler pour cette représentation géométrique d'une morphogenèse ; mais il s'appuie sur l'intuition d'une certaine simplicité de la loi de croissance communément rencontrée dans la nature vivante et qui donne ainsi lieu à des spirales. Sans renoncer à toute explication mécanique, il fait donc globalement fond sur une sorte de principe d'optimalité que la nature suivrait sur ce point. De plus la généralité des gnomons, reconnue depuis l'Antiquité semble plaider pour une pertinence supplémentaire. Nous sommes donc bien dans le cas où une analogie, devenant géométriquement assez précise, de par la construction constante d'une spirale logarithmique dans divers milieux et pour divers organes ou objets naturels, semble pouvoir manifester clairement une homologie. Car c'est le « gnomon » qui incarne ici explicitement l'identité des raisons, racine de toute homologie, puisqu'il peut tout aussi bien et identiquement *être* un nombre entier, qu'une figure géométrique ou qu'une pousse de bourrache.

La forme des feuilles et la ramification

D'Arcy Thompson côtoie également les formes végétales par un autre abord : celui de la forme des feuilles. Pour illustrer le fait que les morphologistes devraient plus souvent prendre en compte la dynamique mécanique de mise en place des formes, dans le cadre de sa « théorie des transformations continues », d'Arcy Thompson propose de faire remarquer qu'il faut souvent imputer les apparentes dissymétries de croissance de la feuille aux seules différences entre les vitesses de croissance selon ses divers axes. Ainsi les dissymétries bien connues des feuilles de bégonia témoigneraient de cette dissymétrie entre les vitesses de croissance, des deux côtés des feuilles, de part et d'autre de leur axe. Nous constatons donc que, là encore, c'est bien une dynamique de croissance conçue sous sa forme la plus simple (le rapport entre les différentes valeurs numériques des vitesses de croissance locale) qui détermine une représentation mathématisée de la forme globale. Il s'agit donc là aussi d'un recours à un principe mécanique d'optimalité, plus exactement à un principe de simplicité maximale dans la dynamique.

Enfin, en ce qui concerne la mathématisation des ramifications, dans l'édition de 1942 de *On Growth and Form*, d'Arcy Thompson se contente essentiellement de rendre compte des travaux théoriques déjà existants, effectués par un certain nombre de physiologistes depuis le début de 19ème siècle et visant à expliquer la valeur des angles que forment entre eux les vaisseaux sanguins[3]. Il fait notamment une place de choix aux recherches du biologiste britannique Cecil D. Murray dans la mesure où ce dernier obtient des résultats prédictifs satisfaisants (correspondant aux mesures trouvées) tout en dispensant le morphologiste de recourir à des principes finalistes voire vitalistes du genre de « l'axiome de Hofmeister » reconnu

[1] [Thompson, d'Arcy (Sir), 1917, 1961, 1994], pp. 195.
[2] [Thompson, d'Arcy (Sir), 1917, 1961, 1994], p. 187.
[3] [Thompson, d'Arcy (Sir), 1917, 1961, 1994], pp. 139-144.

alors par un grand nombre de botanistes. Comme d'Arcy Thompson se fonde sur une simple reprise de ces travaux et que, de plus, ce sont ces travaux qui donneront lieu, par la suite, à toute une série de recherches (poursuivies jusqu'à aujourd'hui), dans la mesure également où ils ouvrent des voies fécondes et où ils dépassent déjà la vision homologique-mécaniste de d'Arcy Thompson sans que celui-ci en prenne d'ailleurs véritablement conscience, nous allons le quitter ici en ouvrant notre enquête à ces physiologistes qui se sont interrogés sur les causes de la morphologie ramifiée des êtres vivants et qui, pour cela, en ont mathématisé la représentation.

CHAPITRE 4 – La bio-« hydraulique » de Cecil D. Murray (1926-1930)

Dans ce chapitre, nous allons présenter des travaux témoignant d'une évolution nette de la mathématisation de la morphogenèse au moyen d'un passage par des explications physiques certes encore mécanistes, et donc toujours en réaction par rapport aux modèles statistiques, mais cette fois-ci nettement importées de ces sciences plus descriptives que sont les sciences d'ingénieur, en particulier l'hydrodynamique. Il faut voir dans cette inflexion la marque du souci qu'ont eu les physiologistes du début du siècle de disposer de lois mathématisées effectivement calibrables et réellement opérationnelles pour la compréhension précise et le diagnostic, notamment pour la médecine. Ce souci se retrouve déjà fortement chez un des précurseurs de cette approche qu'est le physiologiste Cecil D. Murray (1897-1935). Dans les années 1920, Murray est en poste au Département de physiologie de l'Université de Columbia, à New York. Il travaille sur le terrain, notamment aux côtés des médecins de cette même université. Or, à travers la construction de la « loi de Murray », la biologie formalisée va recourir non plus à la mécanique générale mais à la mécanique des fluides : il s'agira de mathématiser les formes vivantes *via* une science d'ingénieur et de rendre la physique plus appliquée de manière à mieux appliquer les mathématiques à la biologie des formes. En effet, il s'avère que les phénomènes mécaniques que connaissent les êtres vivants ramifiés ne sont pas toujours aussi simples ni aussi séparables, puis combinables en leur manifestation, que d'Arcy Thompson voulait bien l'admettre. La combinaison que promettent les mathématiques nécessite que les éléments entrant dans le formalisme aient été auparavant davantage rapprochés des éléments en interaction dans le phénomène réel. Il faut donc décomposer le phénomène en une série de différents facteurs mécaniques concourants.

La ramification vasculaire (1926-1927)

Avant tout, nous nous devons de produire un avertissement. Dans ce paragraphe, comme dans ceux qui suivront, nous ne traiterons bien sûr pas des premières approches mathématisées du système sanguin en général mais seulement des premières approches mathématisées qui ont été en même temps centrées sur la forme visible, sur la structure spatiale ramifiée de ce système. S'il fallait se livrer à une restitution des approches mathématisées en général, notre historique se confondrait quasiment avec une histoire des physiologies physique et chimique dans leur ensemble. Ce qui n'est ni notre objet, ni notre ambition puisque nous désirons simplement pouvoir, à terme, comprendre comment se sont positionnés les travaux de modélisation et de simulation de la forme et de la croissance des plantes dans des travaux concurrents ou plus anciens, et principalement fondés sur des théorisations mathématisées et des modélisations mathématiques.

Aussi, rappelons ici brièvement et simplement pour mémoire que des études mathématisées sur la circulation sanguine, basées sur des modèles physiques analogues, avaient été déjà produites par Leonhardt Euler (1707-1783) dès 1762[1]. Significativement, Euler y avait essentiellement étudié le dimensionnement du système de circulation sanguine mais pas sa forme ni sa configuration spatiale précise. À l'aide d'une formalisation de type mécaniste, Euler se représentait en effet le système circulatoire de façon simplifiée comme un réservoir élastique muni

[1] Dans les *Principia pro motu sanguinis per arterias determinando* publiés dans les œuvres posthumes d'Euler et cités par [Rashevsky, N., 1965], p. 36.

d'une résistance périphérique et d'une pompe[1]. Comme on le voit, les ramifications n'y avaient pas été considérées.

Dans ce domaine de représentation mathématisée de la vascularisation, les travaux fondateurs de Cecil D. Murray ont, pour leur part, été publiés dès 1926 dans les *Proceedings of the National Academy of Sciences,* à Washington[2]. Indépendamment de l'approche finalement globale et assez qualitative de d'Arcy Thompson, car n'allant jamais jusqu'à la quantification des lois, les recherches quantitatives dans lesquelles s'insèrent les travaux de Murray, et que nous allons évoquer, étaient au contraire nées, dans les milieux de la physiologie médicale, de considérations plutôt concrètes et à visées utilitaires. Ces travaux quantitatifs axés sur la mise en place de la morphologie du système cardiovasculaire dépassaient en effet le cadre d'une réflexion éthérée et purement esthétique ou spéculative[3] dans la mesure où y étaient directement associés des enjeux de poids : il s'agissait de clarifier les fonctions du système cardiovasculaire et, plus précisément, d'obtenir des critères objectifs de désignation et de classification des anomalies de la ramification vasculaire pouvant conduire à des symptômes comme « l'anévrisme, les coussins intimaux, les plaques d'athérosclérose, l'effet Fahreus-Lingdvist et autres problèmes de flux sanguin »[4]. Murray adopte donc dès le départ une perspective de type « physiologie physique ». Il reprend en cela les travaux déjà anciens du médecin français Poiseuille (1799-1869) sur la circulation sanguine mais aussi ceux, plus récents et qualitatifs, de l'embryologiste allemand Wilhelm Roux (1850-1924)[5] sur l'angle de ramification des artères. Murray part de l'hypothèse selon laquelle les sections et les angles des ramifications des vaisseaux sanguins, mais aussi des branches des arbres sont tels que la circulation qui s'y produit obéit au « principe du travail minimal »[6]. Le travail qu'il faut selon lui minimiser est celui qui est nécessaire au maintien d'un flux (de sang ou de sève) à travers les vaisseaux[7]. En partant de cette hypothèse d'optimalité, qu'il qualifie de « Principe physiologique du travail minimum », Murray arrive à exprimer ce que l'on a appelé plus tard la « loi de Murray » pour les sections des vaisseaux et pour les angles de ramification.

Par rapport aux premiers travaux de Poiseuille sur la vitesse de la circulation sanguine et sur les forces qui lui font obstacle, l'hypothèse novatrice de Murray est donc double : d'une part, il faut selon lui attribuer au fonctionnement physiologique cette partie de la morphogenèse qui concerne la mise en place des ramifications vasculaires, d'autre part, il faut supposer qu'un principe

---

[1] [Rashevsky, N., 1965], p. 36.

[2] Mais aussi dans le *Journal of General Physiology.* Voir [Thompson, d'Arcy (Sir), 1917, 1961, 1994], p. 140. Pour une présentation historique mais problématisée de façon uniquement scientifique et technique, voir également [Zamir, R., 1976], pp. 213-214 et [Lubashevski, I.A. et Gafiychuk, V.V., 2002], p. 3.

[3] M. Zamir rappelle les enjeux précoces de cette quantification explicative et appliquée *in* [Zamir, R., 1976], p. 213.

[4] [Zamir, R., 1976], p. 213.

[5] À la fin du 19ème siècle, W. Roux, ancien élève de E. Haeckel, est un des premiers promoteurs de l'embryologie expérimentale mécaniste (*Entwicklungsmechanik* : « mécanique développementale »), après qu'elle ait été essentiellement descriptive avant 1880. Il contribue à établir le lien entre embryologie et physiologie. Il est connu pour certaines expériences sur des œufs de grenouille (1888) au cours desquels il tâche de mettre en évidence les processus mécaniques internes et externes de constitution de l'embryon. Il conçoit l'embryologie expérimentale comme une destruction partielle et contrôlée susceptible de mettre en évidence un mécanisme de lutte pour la vie de type darwinien entre les parties de l'organisme en croissance. Voir le chapitre de A. Tétry *in* [Taton, R., 1961, 1995], pp. 532-533. Voir également [Pauly, P. J., 1987], pp. 49-51. Au sujet de la ramification des artères, il avait exprimé en des termes purement qualitatifs une loi, déjà partiellement pressentie par Léonard de Vinci, que l'on peut résumer ainsi : « plus petite est la branche en diamètre, plus elle s'éloigne du tronc avec un angle proche de 90° », [Blaise, F., 1991], p. 12.

[6] [Murray, C. D., 1926], p. 836. Dans l'article de 1927 sur la circonférence et les angles de ramification des arbres, Murray le traduit en un principe du « moindre volume de bois » [“*least volume of wood”*]. Voir [Murray, C. D., 1927], p. 727.

[7] [Lubashevski, I.A. et Gafiychuk, V.V., 2002], p. 1. Comme le précise d'Arcy Thompson, il s'agit ici du coût de fonctionnement du système physiologique « circulation » exprimé en calories ou en erg. Or, ces unités sont traduisibles en celles qui valent pour la mesure du travail physique et qui sont des joules. Voir [Thompson, d'Arcy (Sir), 1917, 1961, 1994], p. 141.

d'optimalité préside à ce mécanisme comme on le suppose selon lui d'ordinaire dans les autres mécanismes physiologiques[1].

La loi de Jean-Léon Poiseuille (1799-1869)

Le polytechnicien et médecin Jean-Léon Poiseuille a fait faire un pas important à la physiologie physique (de laquelle on peut distinguer la physiologie chimique, contemporaine et notamment promue par Liebig[2]) lorsqu'il a mis au point en 1827 l'hémadynamomètre ou appareil à mesurer la vitesse du sang. Dans ce contexte de science expérimentale, Poiseuille a ensuite travaillé sur le frottement que la circulation des liquides ou des gaz rencontre dans des tubes de sections diverses (1844). Poiseuille se fondait sur l'hypothèse d'un écoulement laminaire, c'est-à-dire sur le cas dans lequel « les filets fluides restent parallèles à l'axe du tuyau »[3]. Et il ne considérait que les abaissements de pression interne en conformité avec la seule première composante du théorème de Bernouilli sur la circulation des fluides. Il négligeait enfin la pesanteur ainsi que les infiniment petits du second ordre dans l'expression différentielle des forces de viscosité[4]. Moyennant ces hypothèses assez lourdes, il est en effet possible d'exprimer le débit J d'un fluide de viscosité η circulant dans un tube de rayon a et longueur l en fonction de l'abaissement de pression ΔP :

$$J=\frac{\pi a^4}{8\eta l}\Delta P$$

Cette loi de Poiseuille, proposée dans un contexte essentiellement expérimental, fait donc abstraction de certaines nécessités théoriques pourtant déjà reconnues. Ainsi, nous pouvons remarquer, après Pierre Costabel, que l'hydrodynamique est bien sans doute l'un des premiers domaines où « la mécanique classique et sa méthode d'analyse mathématique » ont été « tenues de composer avec les sciences physiques »[5].

Or cette double hypothèse (explication de la morphogenèse par le fonctionnement physiologique, explication du fonctionnement physiologique par le principe d'optimalité) permet selon lui d'aboutir à une loi mathématiquement exprimable et quantifiable. Voici comment en substance.

Le principe du travail minimum en physiologie morphologique

Pour exprimer le travail déployé par le flux dans un vaisseau, Murray prenait donc en compte la force de freinage due à la viscosité du sang (conformément à la loi de Poiseuille[6]) ainsi que

[1] Selon d'Arcy Thompson, Cecil D. Murray érige en principe biologique fondamental et en « unique critère de toute organisation » l'idée selon laquelle la physiologie doit essentiellement être « considérée comme un problème de minima et de maxima ». Voir [Thompson, d'Arcy (Sir), 1917, 1961, 1994], p. 140.
[2] Voir le chapitre de George Canguilhem *in* [Taton, R., 1961, 1995], p. 480.
[3] Voir le chapitre de Pierre Costabel *in* [Taton, R., 1961, 1995], p. 102.
[4] Sur ces hypothèses impliquant la nature nettement « approchée » et expérimentale de ces lois physiques, voir [Lachnitt, J., 1963, 1978], pp. 69-71.
[5] [Taton, R., 1961, 1995], p. 102.
[6] « Une fois de plus, nous nous référerons à la loi de Poiseuille : elle nous enseigne que la quantité de travail requise pour faire circuler un liquide dans une canalisation doit vaincre une certaine résistance, qui dépend de la viscosité du liquide, du coefficient de friction et des dimensions de la canalisation. Mais nous devons également tenir compte du sang

l'énergie nécessaire au niveau métabolique pour maintenir le volume de sang dans les vaisseaux (énergie supposée dépendre essentiellement et directement de la surface totale de la paroi vasculaire). Il obtenait l'expression suivante :

$$W = \frac{8\eta l j^2}{\pi a^4} + m\pi a^2 l$$

où η est la viscosité du sang, m un coefficient métabolique, J le flux sanguin, a le rayon du vaisseau sanguin considéré et l la longueur de la portion du vaisseau[1].

En minimisant W en fonction de a par dérivation, on obtient l'expression du flux en fonction du rayon :

$$J = \sqrt{\frac{m\pi^2}{16\eta}} a^3$$

Or, comme les flux se conservent lors d'une ramification du vaisseau n°0 en deux vaisseaux n°1 et n°2, on peut écrire :

$$J_0 = J_1 + J_2$$

La loi de Murray s'exprime alors ainsi pour les rayons des 3 vaisseaux :

$$a_0^3 = a_1^3 + a_2^3$$

Il se trouve que cette loi est en effet très souvent observée dans les systèmes vasculaires. En travaillant sur de petits arbres botaniques et avec l'aide de deux assistantes, dès 1925, Murray montrait que cette relation était aussi approximativement valable pour les rayons des ramifications dans les plantes[2]. On note cependant que la valeur de l'exposant (ici 3) empiriquement mesurée peut varier quelque peu[3].

Une autre « loi de Murray » semble également s'appliquer aux angles que font les vaisseaux les uns par rapport aux autres. Pour la mettre en évidence, Murray considérait cette fois-ci le système de la bifurcation dans son ensemble ainsi que le travail total qui s'y développe. Il prenait donc en compte la somme des travaux mécaniques Wi des sections 0, 1 et 2. On peut en effet y faire apparaître les angles de bifurcations par projection des flux sur les axes de coordonnées. En

---

lui-même, dont l'entretien requiert une certaine proportion de l'énergie dépensée par l'organisme, et dont le coût par unité de volume (en théorie du moins) peut être mesuré en calories ou en ergs par jour », [Thompson, d'Arcy (Sir), 1917, 1961, 1994], p. 144. Voir encadré.

[1] Voir [Murray, C. D., 1926], p. 835. Nous reprenons ici la reformulation simplifiée de [Lubashevski, I.A. et Gafiychuk, V.V., 2002], p. 3.

[2] [Murray, C. D., 1926], p. 838.

[3] [Lubashevski, I.A. et Gafiychuk, V.V., 2002], p. 5.

différentiant cette somme et en ayant recours au principe du travail virtuel élaboré par Lagrange, on obtient une expression du type[1] :

$$a_1 \cos\theta_1 + a_2 \cos\theta_2 = (1 + \varepsilon)\, a_0$$
$$a_1 \sin\theta_1 - a_2 \sin\theta_2 = \varepsilon'\, a_0$$

où θ_1 et θ_2 sont les angles que font les deux vaisseaux « fils » par rapport à l'axe du rameau « père » ; ε et ε' (inférieurs à 0.1 en valeur absolue) représentent les déviations possibles par rapport à l'optimalité[2].

Cette relation est également vérifiée empiriquement mais de façon beaucoup moins précise et stable que celle qui porte sur les sections ou rayons des vaisseaux. Tout au moins observe-t-on une conformité tendancielle ou qualitative : « quand un vaisseau de sang parent subit une bifurcation, la branche la plus large fait un angle plus petit avec la direction du parent que n'en fait la branche la plus étroite » [3].

« Modèle » inexpliqué ou « loi » fondée sur une « foi »[4] en l'optimalité de la nature ?

Le fait que la vascularisation que l'on observe semble effectivement obéir à un principe d'optimalité du type « loi de Murray » peut être interprété d'au moins deux façons différentes du point de vue du « mécanisme » sous-jacent. On peut considérer tout d'abord que cette optimisation du travail s'exerce à chaque fois *actuellement* avec la mise en place d'une nouvelle ramification. Dans ce cas, cette morphogenèse biologique particulière qu'est la ramification semble pouvoir être totalement expliquée par l'hydromécanique. Cette interprétation ne semble pas avoir été répandue et déjà Murray semble pencher pour la seconde bien que les premiers textes de 1926 et 1927 ne soient pas dépourvus d'ambiguïté. En effet, l'analyse mathématique paraît trop grossière pour indiquer que c'est *réellement* ce jeu de forces qui à chaque fois opère. Suite à une critique véhémente du physicien Paul S. Bauer, du *Fatigue Laboratory* d'Harvard, Murray fut d'ailleurs sommé de préciser son point de vue. Dans son court article de 1930, entièrement à charge, Bauer répute nul et non avenu le recours de Murray à un « principe physiologique d'optimalité » au motif que l'on n'a pas là affaire à un système physique conservatif (non-ouvert du point de vue énergétique) et qu'en conséquence aucun principe de moindre action ne peut y être *a priori* appliqué[5]. Murray se voit donc dans l'obligation de répondre en levant l'ambiguïté des premiers articles. Dans sa réponse, il choisit de nier tout appui sur un quelconque principe issu de la physique[6]. En dernière analyse, cédant aux arguments assez forts du physicien, il fait reposer la

[1] Voir [Murray, C. D., 1926], p. 837 et [Zamir, M., 1976], p. 218. Intuitivement, on trouve l'angle qui minimise la distance entre un point hors du vaisseau parent et ce vaisseau parent en minimisant les forces de frottement sur les parois, forces dues à la viscosité, donc notamment en minimisant la longueur de ces parois. Voir également [Thompson, d'Arcy (Sir), 1917, 1961, 1994], p. 141.
[2] [Lubashevski, I.A. et Gafiychuk, V.V., 2002], p. 5.
[3] [Zamir, M., 1976], p. 220. Notre traduction. Voir [Murray, C. D., 1926], p. 838. À cette occasion, Murray précise que c'est Roux qui avait, en son temps, rappelé cette loi qualitative.
[4] [Thompson, d'Arcy (Sir), 1917, 1961, 1994], p. 140.
[5] [Bauer, P. S., 1930], p. 617: "This work, in addition to being formally an error by neglecting the gravitational effect on Poiseuille's law of capillary flow, has an inherent fallacy which arises from an improper use of reasoning by analogy".
[6] [Murray, C. D., 1931], p. 445.

validité de son principe sur une simple « consistance » phénoménologique avec les observations courantes. En aucun cas, ce principe ne peut être conçu pour lui comme une continuation des principes de moindre action valant en physique. C'est donc dans ce dernier travail que nous avons de lui que Murray renonce à tout appui direct sur une hypothèse physicaliste et réductionniste. Mais il ne poursuivra pas davantage ses recherches car il décédera prématurément en 1935.

La plupart des auteurs qui se sont servi de la « loi de Murray » ont considéré par la suite qu'ils ne disposaient pas par là d'une véritable théorie de la ramification vasculaire et végétale. Contre l'approche que d'Arcy Thompson aurait voulu voir adopter, ils se sont massivement accoutumés à penser que c'est plutôt à travers la sélection naturelle que ce travail d'optimisation s'est à la longue effectué en rendant préférentiellement viables les types de ramifications déterminées génétiquement de façon optimale d'un point de vue hydraulique et mécanique au détriment des autres. En quel cas, cette « loi » pourra être davantage conçue comme un « modèle »[1] mathématique puisqu'elle ne prétend pas rendre compte directement, et de façon semblablement reproductrice, du processus actuel de mise en place de la ramification dans l'ontogenèse. C'est ce terme de « modèle » que les chercheurs adoptèrent par la suite quand ils s'inscrivirent préférentiellement dans cette seconde interprétation, même s'ils parlent encore aujourd'hui de « loi de Murray » pour se référer à l'origine historique du modèle. Si bien que devant ce cas d'évolution terminologique, nous avons un moyen de comprendre précisément comment il arrive qu'on en passe de la notion de « loi » à la notion de « modèle » pour désigner le même objet théorique. En effet, alors même qu'il est exprimé identiquement, le statut explicatif du « modèle » mathématique est compris bien différemment. Au contraire de la « loi », il ne prétend plus décrire les événements causaux effectifs et agissant actuellement dans le phénomène « expliqué ». Le modèle mathématique propose un scénario plausible mais ne prétendant pas aller au cœur ou au fond des causalités qui s'expriment en dernière analyse dans le phénomène global modélisé. Il sert toutefois à rejoindre la physiologie expérimentale et médicale dans la mesure où il permet de prédire et de retrouver les mesures faites sur le terrain.

Significativement, d'Arcy Thompson lui-même, malgré son aversion pour la réduction de l'explication morphologique à la théorie de l'évolution, penche également pour cette seconde interprétation[2]. À notre avis, c'est notamment parce qu'il ne peut plus recourir ici à son « diagramme des forces ». Devant la réussite de Murray, du point de vue de la calibration de sa loi, dont il veut rendre compte et qu'il produit aux yeux de ses lecteurs comme pour appuyer encore son épistémologie de l'homologie mécaniste, il est en fait beaucoup moins à l'aise. Dans ce cas de figure en effet, il est bien plus difficile de se donner à voir comment les forces subtilement réparties de l'hydrodynamique, cette science d'ingénieur plus que de mécanicien, pourraient directement infléchir et conformer les vaisseaux aussi parfaitement que cela était possible en revanche dans les diagrammes d'équilibre de forces mécaniques simples. D'autant plus qu'il faut déjà un flux, donc un vaisseau, pour qu'il y ait une force de frottement due au flux[3].

C'est bien là que l'on sent combien le mécanicisme homologique de d'Arcy Thompson, en guerre contre la modélisation statistique et déracinée, ne peut déjà plus réellement valoir et cède

---

[1] C'est la terminologie actuellement consacrée. Voir [Lubashevski, I.A. et Gafiychuk, V.V., 2002], p. 3 : "The idea of *Murray's model* is reduced to the assumption that physiological vascular networks, subject through evolution to natural selection, must have achieved an optimum arrangement corresponding to the least possible biological work needed for maintaining the blood flow through it at a required level." C'est nous qui soulignons.

[2] « En résumé, la circulation sanguine est avant tout un processus de transport de l'oxygène, et il semble qu'un mode de transport efficace ait été établi par approximations successives », [Thompson, d'Arcy (Sir), 1917, 1961, 1994], p. 141.

[3] On retrouve ici le vieil argument vitaliste qu'Aristote opposait aux physiologues mécanistes dans les *Parties des animaux*, Livre I : dans la genèse de la forme du nez, on ne peut imaginer que les narines soient creusées par le passage de l'air !

inévitablement du terrain devant les raisons de la nouvelle approche par modèles : dans les années 1920, les sciences appliquées comme l'hydrodynamique, nées de considérations expérimentales et techniques, se révèlent déjà de bonnes candidates auprès de la morphologie pour relayer efficacement la mécanique analytique dans sa fonction de médiation avec les mathématiques. Mais il est justement très instructif de voir que, pour d'Arcy Thompson, la conformité de la nature à la loi de Murray n'est finalement rien de plus qu'un signe supplémentaire de « la perfection des réalisations de la nature » en laquelle il faut avoir « foi ». C'est pour lui une preuve de plus que l'hypothèse de l'optimalité doit tout de même jouer un rôle heuristique constant chez le morphologiste du vivant comme chez le physiologiste. Mais il ne s'attarde nullement sur le fait qu'il a fallu pour cela sacrifier à la pureté de l'analyse mécanique. En fait, ce que le spéculatif d'Arcy Thompson considérait comme un « postulat » servant de « méthode de découverte »[1], les physiologistes appliqués le considérèrent plus tard comme un « modèle », quantifiable utile pour le diagnostic mais il est vrai non réellement expliqué ni expliquant. La « loi de Murray » restera donc assez longtemps une loi phénoménologique connue et reconnue mais sans réelle utilisation dans la mesure où elle ne s'inscrit pas dans un scénario réellement explicatif et faisant lien avec d'autres faits expérimentaux. Née dans un contexte où le principe d'optimalité pouvait paraître homogène, dans son transfert de la physique à la biologie, et passait pour une légitimation de l'approche théorico-mathématique, cette loi put d'abord semblée parfaitement construite et fondée, aux yeux de certains. Mais confrontée à la légèreté de cet argument du transfert de l'optimalité, son statut épistémique dérivera par la suite vers celui d'un simple modèle descriptif.

Quant à l'approche mathématico-mécaniste de d'Arcy Thompson, si elle ne peut plus être valablement défendue comme alternative théorique au modèle et à son déracinement (cette première forme de résistance échoue donc), elle va cependant être très vite relayée par une autre forme de résistance physicaliste qui aura son heure de gloire dans la biologie théorique américaine des années 1940 et 1950. Autour de la personne de Rashevsky, une partie de la biophysique va en effet poursuivre la croisade contre les modèles mais en partant d'une idée cette fois-ci plus riche et mieux informée de ce que la physique peut proposer à la biologie comme idéal de mathématisation.

[1] [Thompson, d'Arcy (Sir), 1917, 1961, 1994], p. 140.

CHAPITRE 5 – La « biophysique » de Nicholas Rashevsky (1931-1954)

Nicholas Rashevsky est ukrainien d'origine. Il naît à Chernikov en 1899. En 1917, à 18 ans, il rejoint la marine de l'armée des russes blancs qui se sont ligués contre la révolution bolchevique. En 1920, avec Emily, celle qui deviendra plus tard sa femme, il s'enfuit à Constantinople. Pendant un an, il y suit des cours dans un Collège américain. En 1921, à Prague, il suit des cours en physique théorique et il travaille plus particulièrement sur la théorie de la relativité. C'est donc là, à Prague, qu'il complète ses études de physique avant d'émigrer en 1924 aux Etats-Unis, après un bref passage à Paris. À partir de 1927, à l'Université de Pittsburgh puis, à partir de 1934, au Département de Physiologie de l'Université de Chicago, il conçoit progressivement le projet de bâtir une « biophysique mathématique » sur le modèle et dans le prolongement de la physique mathématique. C'est en 1934[1] qu'il propose de reprendre le terme de « biophysique » alors qu'il a déjà longuement réfléchi à la fois sur l'œuvre de d'Arcy Thompson, sur celle de Lotka comme sur celle du mathématicien italien Vito Volterra (1860-1940)[2]. À cette date, il a déjà publié un certain nombre de travaux sur la mécanique de la cellule en division. Cette même année, il reçoit une bourse de la fondation Rockefeller qui récompense et encourage ainsi ces premiers travaux. Conforté dans son approche, son projet devient ambitieux : il s'agit d'amorcer un développement véritablement systématique et tous azimuts de la biologie mathématique[3]. En fondant le *Committee on Mathematical Biology* (d'abord informel en 1934 puis officiel à partir de 1947), il s'entoure d'un certain nombre d'assistants et d'élèves comme Alston S. Householder, Herbert D. Landahl, John M. Reiner, Alvin Weinberg et Gale Young[4]. Ces derniers, comme lui-même, vont d'abord publier de façon séparée et dispersée dans des revues comme *Growth, Biological Review, Acta Biotheoretica, Psychometrika* ou même *Physics*. En fait, dès 1938, Rashevsky fonde sa propre revue : le *Bulletin of Mathematical Biophysics*. Cette revue est d'abord publiée au titre de supplément du journal *Psychometrika* avant de devenir indépendante. Elle édite essentiellement des essais de théories physico-mathématiques pour la biologie. Elle refuse par principe les travaux purement statistiques ou ne proposant que des équations obtenues empiriquement[5]. À partir de cette date donc, ses assistants comme ses proches collègues vont publier en quelque sorte sous sa direction. Cette « direction » de recherche est d'ailleurs matérialisée d'une autre façon la même

[1] Pour cette date approximative, voir [Rashevsky, N., 1934a], p. 176 et [Rashevsky, N., 1960a], p. 141.
[2] Pour une analyse épistémologique des travaux de Volterra, nous renvoyons à [Israel, G., 1996], pp. 17-74. L'historien des sciences Giorgio Israel y montre que Volterrra a été un des premiers à développer consciemment une attitude modéliste en dynamique des populations. Pour l'auteur, le « modélisme » serait à définir comme une manière de mathématiser directement un problème biologique en usant d'une analogie purement mathématique, sans se fonder sur un substrat intermédiaire. Volterra serait ainsi plus modéliste que Lotka qui, pour sa part, s'appuie encore sur une analogie chimique pour mathématiser la dynamique des populations biologiques. Voir *ibid.*, pp. 70-72. Pour notre part, nous ne sommes pas tout à fait convaincu et pensons qu'il reste chez Volterra une tendance au mécanisme dont sa définition, étroite car précisément mécaniste, des modèles témoigne. La dynamique des populations est le lieu de naissance de « modèles » qui restent théoriques en ce qu'ils sont constructibles par analogie entre des molécules et des individus vivants. Du reste, Israel nous montre en fait que les derniers écrits de Volterra témoignent de ce scrupule. Voir *ibid.*, p. 73.
[3] Sur ce désir de recherche « systématique », voir les propos de [Rashevsky, N., 1965], p. 36.
[4] [Rashevsky, N., 1938, 1948], p. xvi.
[5] Voir [Maini, P. K., Schnell, S. et Jolliffe, S., 2004], pp. 595-596.

année : par la publication d'un ouvrage de synthèse collectif mais largement « réécrit » par Rashevsky et intitulé *Mathematical Biophysics.*

Rashevsky est un personnage important à situer et à comprendre de notre point de vue pour plusieurs raisons[1]. D'une part, il a très tôt fédéré tout un ensemble de recherches en biologie mathématique. De ses travaux, comme de ceux de ses collègues qu'il a publiés, sont sorties un assez grand nombre de suggestions qui auront un certain poids dans l'avenir, comme nous le verrons. D'autre part, Rashevsky nous a gardé les traces de ses réflexions épistémologiques aussi bien dans la revue *Philosophy of Science*, fondée en 1934 par ses collègues philosophes de l'Université de Chicago, que dans les articles qu'il a publiés ensuite dans sa propre revue ou dans son ouvrage synthétique de 1938. Il l'a d'ailleurs refondu et réédité une première fois en 1948 puis de nouveau en 1960. Enfin, à la différence des physiciens et mathématiciens qui mathématisaient la biologie à l'échelle des populations, Rashevsky s'est particulièrement penché sur les problèmes de croissance de l'individu. Nous évoquerons donc cet acteur de la biologie mathématique en nous limitant toutefois et naturellement, pour certains détails, aux travaux sur la mathématisation de la forme et de la croissance.

Avant tout, il nous faut noter que ses essais de théorisations mathématiques n'ont pas toujours été animés d'une même approche de principe à l'égard de l'origine, de la nature et de l'usage des mathématiques qu'on devait y faire paraître. Il est effectivement très instructif de voir combien la position de Rashevsky a évolué sur la question précise du rapport entre la physique et la biologie mathématique. Cette évolution épistémologique, tout au moins à ses débuts, n'est pas sans rapport avec les résultats de ses propres travaux scientifiques. Au regard de l'évolution qui transparaît dans ses publications et en simplifiant ce qui a dû se manifester sous la forme d'une prise de conscience et d'une évolution lentes, nous pouvons dire que ses positions épistémologiques successives furent en effet au nombre de deux. Nous nous occuperons d'abord ici de la première période (1931-1954) dans la mesure où elle prolonge et complexifie les intuitions de d'Arcy Thompson et Murray tout en permettant un dialogue cette fois-ci assez fécond entre la biologie mathématique, ou ce qui aspirait à le devenir, et la biologie quantifiée qu'était la biométrie. Cette première épistémologie rashevskyenne a en effet permis des rencontres inédites avec les biologistes expérimentateurs. De plus, des travaux d'importance vont en résulter en physiologie physique. Par la suite, sous l'effet de plusieurs facteurs (mais aussi de travaux tout à la fois concurrents et inspirateurs) que nous essaierons de déterminer, Rashevsky a semblé séduit par le recours à la topologie, c'est-à-dire à des mathématisations d'un autre type, significativement plus directes car ne passant pas nécessairement par la médiation de la physique

Le premier Rashevsky (1931-1948) et le projet de la « biophysique » : un réductionnisme

L'idée de travailler à concevoir une nouvelle partie de la biologie que l'on pourrait qualifier de « biophysique » était d'abord venue à Rashevsky de l'admiration, mêlée d'une certaine insatisfaction, face aux travaux de d'Arcy Thompson (1917). Dans sa préface de 1938, il précise que le livre de d'Arcy Thompson lui paraît en effet « remarquable »[2] mais, que dans le fond, il ne lui semble pas avoir donné la véritable impulsion nécessaire à la naissance d'une biologie mathématique. Son auteur a donc au mieux exprimé en des termes séduisants une authentique

[1] Dans un ouvrage récent, l'épistémologue américaine Evely Fox Keller, sans entrer dans le détail de son épistémologie ni de ses travaux, a rapporté certains des épisodes de la vie intellectuelle et académique de Rashevsky. Voir [Keller, E. F., 2002, 2003], pp. 82-89.
[2] [Rashevsky, N., 1938, 1948], p. vii.

attente des milieux scientifiques en ces matières, c'est-à-dire le désir de recourir à des mathématiques non plus pour de simples applications occasionnelles (ce qui lui semble déjà très fréquent en 1938 dans le cadre de ce qu'il appelle la « biologie quantifiée ») mais pour « l'édification d'une biologie mathématique systématique »[1], c'est-à-dire présentant une fondation mathématique rigoureuse et unifiante. Ce sentiment d'insuffisance et de flou face aux travaux de d'Arcy Thompson est assez généralement partagé à l'époque, notamment par le botaniste anglais Claude Wilson Wardlaw (né en 1901)[2].

Selon Rashevsky, il en est tout autrement des travaux de Lotka comme de Volterra sur « l'interaction entre espèces biologiques dans une population d'organismes »[3]. Il les juge pour sa part déjà réellement « fondamentaux » en leur domaine et il déplore même qu'une certaine prévention chez les biologistes ait empêché qu'ils soient davantage reconnus. Cette prévention, il l'attribue au fait qu'à son époque, le biologiste considère souvent les mathématiques au mieux comme un ingénieur le fait : pour des raisons purement utilitaires[4]. Un biologiste ne s'intéresse aux mathématiques que s'ils peuvent lui donner immédiatement une formule utilisable. C'est contre cet esprit qu'il juge étroit qu'il lutte. Il prend alors comme exemple le développement récent de la physique théorique : il n'y aurait pas eu de théorie de la relativité sans les études mathématiques antérieures de Riemann et si ces dernières ne s'étaient d'abord émancipées du souci de coller immédiatement à la réalité empirique[5]. Il ne faut donc pas craindre de se proposer d'abord l'étude de « structures abstraites »[6]. Pourtant et très significativement, Rashevsky ne veut pas non plus s'inscrire dans la lignée de Lotka et Volterra, car il a une autre idée en tête. C'est là que sa première épistémologie s'exprime sans ambiguïté. Dans la suite, nous allons tâcher de la saisir en acte et plus particulièrement dans un travail de mathématisation de la forme des plantes que Rashevsky publiera dès 1948. Mais précisons dans un premier temps ce que la biophysique de Rashevsky doit à Lotka.

Auparavant, dans ses *Elements of Physical Biology* de 1925, le physico-chimiste Alfred J. Lotka avait en effet introduit l'expression « Biologie physique » pour désigner cette discipline qui appliquerait « les principes physiques à l'étude des systèmes supportant la vie comme un tout »[7]. Comme les préoccupations de Lotka se tournaient principalement vers l'évolution et la dynamique des systèmes comprenant des populations d'êtres vivants, la « Biologie physique » devait être, selon lui, une partie d'une discipline plus large baptisée « Mécanique générale de l'évolution ». Lotka se trouvait ainsi en sympathie avec la voie ouverte par l'embryologiste mécaniste Jacques Loeb selon lequel on devait considérer l'« organisme comme un tout ». Tel était en effet le titre d'un ouvrage que Loeb avait fait paraître en 1916. Au moyen d'hypothèses sur l'existence de protéines inconnues et cachées, ce dernier essayait d'y maintenir encore une unité de façade entre les mécanismes de l'hérédité et ceux du développement dans l'embryogenèse et dans l'ontogenèse. Mais Loeb ne fut pas suivi sur ce point[8]. Et même si le mot d'ordre de Loeb lui plût,

---

[1] [Rashevsky, N., 1938, 1948], p. vii.
[2] "It must be said however that although d'Arcy Thompson's book showed how phenomena of form and structure might be interpreted, it did not really serve as a guide to the young experimental worker, i.e. how to make an effective beginning", [Wardlaw, C. W., 1968], p. 6.
[3] [Rashevsky, N., 1938, 1948], p. vii. À cette époque, à aucun moment, Rashevsky n'évoque Fisher et ses travaux fondateurs pour la génétique des populations. Sans doute faut-il voir là une trace supplémentaire de son aversion pour les modèles déracinés, intégrant l'aléa et refusant de se fonder sur une théorie formalisée.
[4] Voir [Rashevsky, N., 1934a], pp. 176-178.
[5] [Rashevsky, N., 1935b], p. 415
[6] [Rashevsky, N., 1935b], p. 415 : "purely abstract speculation", "abstract structure".
[7] "…to denote the broader field of the application of physical principles in the study of life-bearing systems as a whole", [Lotka, A. J., 1925, 1956], p. 49.
[8] Voir la présentation de [Pauly, P. J., 1987, 1990], pp. 148-149.

pour sa part, Lotka choisit plutôt d'élever encore le niveau de ses considérations à la vie organique tout entière telle qu'elle est insérée dans un environnement physico-chimique. Comme l'historienne des sciences Sharon E. Kingsland l'a montré, Lotka manifestait ainsi son penchant pour une approche plutôt inspirée de la vision intégrative et évolutive de Spencer[1]. Quant à la « Biophysique », Lotka rappelait que le terme était récent, d'origines diverses, et qu'il tendait à désigner, de manière encore très désordonnée, tout type d'étude des divers aspects physiques de la biologie. Il formait le souhait de le voir désormais désigner uniquement l'étude de la « physique des processus individuels de vie »[2]. À ce titre, la biophysique devait devenir une sous-discipline de sa « biologie physique ». En fait, Lotka emboîtait ces différentes disciplines parce qu'il était en quête d'une systématisation et d'une unité fondamentale. Comme on le sait par ailleurs, cette unité, il la trouva dans des notions comme celle de « transformateurs d'énergie », dans une vision donc passablement énergétiste[3].

De son côté, dans l'introduction à son propre ouvrage de 1938, et après avoir rappelé en quoi il défère auprès de ses prédécesseurs, Rashevsky entend situer sa propre perspective. Il affirme ainsi nettement vouloir que sa propre « biophysique » soit à une biologie physique ou mathématique de ce dernier type (celle de Lotka et Volterra née fondamentalement dans les travaux de dynamique des populations) ce que « la théorie moléculaire est, en physique, à la thermodynamique ». En effet, dit-il, cette dernière « s'occupe de grandes quantités de matière animées de phénomènes relativement grossiers »[4]. Cela la dispense donc d'avoir « à supposer des éléments hypothétiques à l'œuvre derrière ces phénomènes de masse »[5]. Ainsi, il lui suffit de « se baser sur quelques postulats acceptés et basés eux-mêmes sur des preuves expérimentales directes »[6]. Voici comment il justifie son propos :

« Les travaux de Lotka et Volterra, cités précédemment, considèrent le monde organique comme un tout. Sur la base d'une observation directe, ils postulent certaines relations générales entre les organismes et, à partir de là, ils développent une théorie mathématique des divers phénomènes impliquant de telles relations. Mais ils ne vont pas jusqu'à considérer la structure détaillée de chaque organisme individuel ni la structure des relations entre les parties fondamentales de cet organisme avec le monde physique inorganique. Ce sont ces dernières considérations qui font l'objet de ce livre. Il est à espérer que, dans le futur, les relations entre les organismes individuels, telles qu'elles sont postulées dans les travaux de A. Lotka et V. Volterra, seront dérivées des propriétés biophysiques fondamentales de ces organismes tels qu'ils sont étudiés ici. Un plus ample développement de ces deux branches de la biologie mathématique les verra avancer, main dans la main, de même que les développements de la thermodynamique et de la physique atomique les ont vu faire. »[7]

---

[1] Voir [Kingsland, S. E., 1985, 1995], pp. 124-125.
[2] "…the physics of individual life processes", [Lotka, A. J., 1925, 1956], p. 49.
[3] [Lotka, A. J., 1925, 1956], chapter XXIV, pp. 325-335. Voir le commentaire de [Kingsland, S. E., 1985, 1995], chapter 2, pp. 25-49.
[4] [Rashevsky, N., 1938, 1948], p. vii.
[5] [Rashevsky, N., 1938, 1948], p. vii.
[6] [Rashevsky, N., 1938, 1948], p. vii.
[7] Notre traduction du passage suivant : "The above mentioned works of A. Lotka and V. Volterra deal with the organic world as a whole. They postulate, on the basis of direct observation, certain general relations between organisms and therefore develop a mathematical theory of various phenomena involving such relations. But they do not go into the consideration of the detailed structure of each individual organism or of the relations of the fundamental parts of this organism to the physical inorganic world. These latter considerations form the subject of this present book. It is hoped that in the future the relations between individual organisms, as postulated in the works of A. Lotka and V. Volterra, will be derived from the fundamental biophysical properties of these organisms as studied before. A further development of

Voilà donc la principale raison pour laquelle, selon Rashevsky, la démarche de Lotka et Volterra paraît assimilable à celle qui caractérise la thermodynamique dans son rapport à ce qu'il appelle lui-même la « physique moléculaire ». Mais, dans ce passage, nous constatons très clairement que c'est en fait à l'œuvre de Lotka que Rashevsky pense essentiellement. Outre le fait que Rashevsky souscrit finalement à la restriction que Lotka avait lui-même imposée à la biophysique, rappelons de surcroît que la manière dont Volterra présente ses travaux est bien moins holistique que ce n'est le cas pour Lotka[1]. Rashevsky retient donc plutôt l'intérêt et la valeur de l'approche macroscopique de la « biologie physique » de Lotka[2] dans la mesure où il considère lui aussi que le monde organique doit être considéré à certains égards « comme un tout »[3].

Mais il pense, comme Lotka, que la biologie mathématique doit aussi ouvrir un autre front, à l'échelle de ce qui correspond au microscopique en physique, c'est-à-dire à l'échelle des éléments biologiques dans leur consistance physique, et que c'est là qu'elle gagnera définitivement le nom de *biophysique*. Si, de plus, cette première épistémologie de Rashevsky ne peut être qualifiée de physicalisme au sens strict et fort, tout au moins présente-t-elle la forme très nette d'un réductionnisme, c'est-à-dire d'une option épistémologique selon laquelle tout phénomène biologique sera à terme au moins représentable au moyen d'une théorisation physique. Mais la position de Rashevsky sur ce point reste en fait assez subtile. Elle est inséparable de la nature de ses travaux et de ses résultats en ce début des années 1930.

Forme et mécanisme de division de la cellule

À la fin des années 1920, c'est donc dans l'esprit que proposait Lotka pour la biophysique que Rashevsky se livre à des tentatives de théorisations physico-mathématiques de la croissance et de la division de la cellule. Il essaie de montrer si l'on peut quantifier *a priori* la taille critique à partir de laquelle une cellule entre en division. Se séparant d'abord sciemment du mécanicisme réducteur de d'Arcy Thompon, son premier essai consiste en une théorie électrico-mathématique. La conviction que ce ne sont pas des phénomènes électriques (des flux d'ions dans les membranes) mais des phénomènes mécaniques (donc essentiellement le *métabolisme* en tant que phénomène mécanique principal au niveau cellulaire) qui mènent au processus de division cellulaire et de prolifération sera un des résultats majeurs de ces premières recherches. Mais c'est bien en travaillant d'abord dans une perspective d'électrophysiologie[4] que Rashevsky se propose

---

these two branches of mathematical biology will go hand in hand, as have the developments of thermodynamics and atomic physics", [Rashevsky, N., 1938, 1948], p. viii.

[1] Voir [Israel, G., 1996], pp. 52-82.

[2] Rappelons que le titre initial de l'ouvrage d'Alfred Lotka était *Elements of physical biology* (Baltimore, Williams and Willkins, 1925). C'est dans la deuxième édition qu'il deviendra *Elements of Mathematical Biology* (New York, Dover, 1956). Voir [Kingsland, S. E., 1985, 1995], p. 294.

[3] "The organic world as a whole", [Rashevsky, N., 1938, 1948], p. 616. Dans ce chapitre de 1948, Rashevsky part de l'ensemble de toutes les relations binaires possibles (ou corrélations) entre deux caractéristiques (ou caractères génétiques) d'un organisme supposées quantifiables. À chaque couple de valeurs pour ces deux caractéristiques, correspond un coefficient de corrélation. Or, ce coefficient de corrélation peut également être exprimé par le rapport (ou taux) entre le nombre d'individus présentant ce couple de valeurs et le nombre total d'individus de ce type présents dans tout le monde organique. Si l'on prend ensuite en compte toutes les interactions entre ces différents types d'individus (présents en taux variables), on va pouvoir exprimer la variation de ces taux les uns par rapports aux autres, c'est-à-dire la dynamique totale du monde organique pour ces deux caractéristiques (la dynamique de la part relative des types d'individus). En appliquant le principe de maximisation du flux total d'énergie tel que Lotka l'avait proposé pour le monde organique, Rashevsky obtient alors une loi de croissance généralisé (*ibid.*, pp. 618 et 625) dont une forme particulière est la courbe logistique en S. Mais il fait remarquer que l'interprétation biophysique n'est pas donné par là pour autant.

[4] [Cole, K. S., 1965], p. 137.

une « théorie physico-mathématique de l'excitation et de l'inhibition »[1] électrique au niveau des tissus. Pour expliquer le fait expérimental de la résistance électrique des tissus organiques, il introduit la notion d'accommodation ; ce qui fait du processus électrophysiologique un phénomène dit à « deux facteurs », l'un concurrençant l'autre : l'excitation et l'accommodation. Au moyen de cette notion d'accommodation électrique, il pense, par la suite, pouvoir expliquer la division cellulaire et, pourquoi pas, la morphogenèse des métazoaires.

Mais c'est un échec. Il l'évoquera lui-même encore très laconiquement en 1960 : « une étude mathématique des conséquences de ces hypothèses révéla qu'elles étaient intenables quantitativement »[2]. L'ordre de grandeur des forces d'origine électrique obtenu par la théorie ne correspond en effet en rien à celui qu'il faut supposer au vu des données mesurées sur la mécanique des membranes. Il n'est donc même pas besoin de se livrer à une enquête expérimentale plus poussée. Il faut rejeter cette application de la théorie électrique au développement cellulaire et à l'embryogenèse comme, avec elle, la mathématisation qu'elle promettait[3].

Cet épisode douloureux montre que Rashevsky, contrairement à ce que l'on pourrait croire, n'hérite pas passivement et directement de d'Arcy Thompon ni même de Loeb et de leurs perspectives mécanistes. Il reconnaît par ailleurs lui-même qu'elle sont déjà vieillies pour leur temps. Son retour au mécanicisme est au contraire une décision mûrement prise à la suite de son échec initial dans la tentative de « moderniser », au moyen des concepts issus de l'électrodynamique, le réductionnisme physicaliste en biologie et son indéfectible prédilection pour l'entrechoc des matières solides dans des modèles mécaniques.

En effet, dès 1931[4], Rashevsky donne pour le cas de la cellule individuelle une autre théorie mathématique plausible de l'élongation, de l'instabilité puis de la division sous l'effet cette fois-ci purement mécanique des flux de métabolites à travers la membrane. Cela semble une véritable première réussite car les équations mécanico-mathématiques résultant alors des hypothèses simplificatrices sur les flux de substances permettent de calculer la taille critique moyenne d'une cellule en fonction des paramètres des flux et de résistance aux flux des membranes[5]. Or, il se trouve que c'est bien approximativement ce que l'on trouve lorsque l'on mesure la taille d'une cellule réelle : il y a donc un semblant de confirmation empirique. Quant à la méthode formelle, c'est là en quelque sorte reprendre, en la complexifiant et en l'appliquant aux processus de diffusion au niveau cellulaire, l'approche du « diagramme des forces » de d'Arcy Thompson. Ce premier échec comme ce premier résultat positif confirment donc Rashevsky dans l'idée qu'une approche physicaliste pour la morphogenèse reste pertinente, même si certains aménagements épistémologiques doivent être faits.

---

[1] [Cole, K. S., 1965], p. 171. Même si elle souffre de n'avoir pas d'interprétation physique, cette théorie sera reprise par plusieurs auteurs par la suite et dans d'autres contextes plus classiques et descriptifs de caractérisation électrophysiologique des tissus. Voir la liste de trois de ces auteurs *in* [Cole, K. S., 1965], p. 137. Mais avec le phénomène d'accommodation, cette « théorie » présente l'introduction d'une notion *ad hoc,* ce qui, on le comprend, ne pouvait totalement satisfaire Rashevsky lui-même et son désir d'interprétation physique. Il en fera donc peu de cas.

[2] [Rashevsky, N., 1960b], pp. 141.

[3] Ce point montre que Rashevsky n'a pas totalement méprisé la confrontation réglée de ses théories avec l'expérience même si, en l'espèce, il ne s'est servi que de mesures déjà disponibles dans les publications de biologie expérimentale. Il n'a donc pas procédé lui-même à des expériences.

[4] Voir [Rashevsky, N., 1934a], pp. 183-186.

[5] [Rashevsky, N., 1960b], pp. 142.

Physicalisme unitaire et convergence avec le « positivisme logique » de Rudolf Carnap

Après cet épisode, Rashevsky se révèle en effet plus prudent par rapport aux *a priori* que l'on pourrait avoir concernant les formalismes à utiliser en biophysique et notamment dans le domaine de la morphogenèse. Il garde en perspective « l'unification de toutes les sciences de la nature »[1] sous un ensemble de lois physico-mathématiques plutôt qu'une simple et immédiate réduction à l'une d'entre elles dans sa forme existante. Il prône un physicalisme unitaire plus que prioritairement réducteur. Lorsqu'il commence à constituer son *Committee on Mathematical Biology* à Chicago, Rashevsky considère que, du point de vue de la mathématisation, la biologie a simplement pris du retard sur la physique à cause de la complexité particulière de ses objets, mais qu'elle doit à terme atteindre à des expressions très formalisées comme celles de la physique, d'où sa reprise du terme « biophysique », discipline qu'il juge générale et non spéciale, cela au contraire de Lotka. C'est même parce que les phénomènes biologiques sont à ce point complexes que se justifie d'autant plus, pour eux, l'approche mathématique dès lors qu'elle permet justement de faire abstraction des détails et de retenir l'essentiel[2]. Cette formalisation de la biologie doit en conséquence tôt ou tard advenir car il récuse en même temps et fortement l'idée qu'un quelconque principe vital de nature non-physique puisse intervenir dans le fonctionnement du vivant.

Dans toutes les publications de Rashevsky auxquelles nous avons eu accès, il n'est pratiquement jamais fait mention de philosophes ou de logiciens. Les seuls non biologistes que l'on retrouve volontiers dans ses textes et dans ses bibliographies sont des physiciens comme Newton, Einstein ou Minkowsky. Pourtant, face à ce que nous avons indiqué de l'épistémologie ouvertement réductionniste et unitaire de Rashevsky, on ne peut que sentir des échos troublants avec des textes majeurs, et contemporains, de la philosophie de la logique et des sciences comme ceux de Rudolf Carnap (1891-1970)[3]. Mais Rashevsky ne le cite jamais tel quel. Il est cependant à noter qu'en 1934, il est partie prenante dans le projet de ses collègues philosophes, dont William Marias Malisoff (professeur à l'Université de Philadelphie), de fonder la revue *Philosophy of Science*, dont Malisoff sera l'éditeur principal. Rashevsky n'est bien sûr pas considéré comme philosophe, mais il s'intéresse à la psychologie et à l'épistémologie. Il est un membre à part entière du conseil consultatif de la revue, aux côtés d'autres scientifiques et philosophes comme P. W. Bridgman, J. von Neumann, Marcell Boll, Ronald A. Fisher, Wolfgang Köhler, Paul Weiss, Alfred N. Whitehead, Norbert Wiener, Eugen Wigner et Sewall Wright...

Or, ce que l'on ne peut que constater, c'est que Rashevsky contribue pour sa part très fortement à cette revue naissante. Il y publie quatre articles coup sur coup entre 1934 et 1935. Dans ces travaux, il vulgarise ses propres contributions en physiologie théorique, publiées entre 1929 et 1933 dans des revues scientifiques comme *Protoplasma*, le *Journal of Physiology*, le *Zeitschrift für Physiologie*, le *Journal of General Psychology*, mais aussi *Physics*. Et il développe une méthode de théorisation mathématique générale très ambitieuse puisqu'elle va de la cellule

[1] "We shall in this book, whenever possible, look for physical interpretation, in line with the desire to unify all natural science", [Rashevsky, N., 1938, 1948], p. viii.

[2] [Rashevsky, N., 1934a], p. 178 : "But nowhere do we see the attempt to build a complete and consistent system of mathematical biology. The excuse most often advocated for this is the tremendous complexity of biological systems and biological phenomena […] True, biological phenomena are perhaps more complex than ordinary physical ones. But even the latter are on their face so complex, that their complete mathematical treatment may appear impossible. And yet it is just the mathematical method of approach that enable us to see through that complexity. The important thing in the mathematical method is to abstract from a very complex group of phenomena its essential features and thereby to simplify the problem".

[3] Pour une présentation générale du contexte philosophique, voir [Jacob, P., 1980], pp. 101-113.

individuelle[1] à la psychologie[2] et à aux relations humaines[3]. Pour justifier ces sauts de niveaux organiques en niveaux organiques, il s'appuie encore et toujours sur le fait qu'il se donne ce qu'il appelle des « systèmes *in abstracto* »[4], ce qui permet à la théorie mathématique de faire d'abord abstraction des mécanismes physico-chimiques impliqués. Mais cela n'implique par ailleurs nullement pour lui qu'il faille renoncer à la réductibilité de la biologie à des lois physiques générales encore à découvrir.

Rashevsky n'a certes peut-être pas rencontré Carnap en 1934. Mais il est certain qu'il a lu de près le premier article de la première livraison de *Philosophy of Science* et qui n'était autre qu'une contribution de Carnap lui-même (« *On the Character of Philosophic Problem* »[5]), traduite par Malisoff, et où l'auteur résumait ses thèses principales qui paraissaient en même temps, en allemand, dans la *Logische Syntax der Sprache*[6]. Un indice supplémentaire nous montrant que la perspective de Carnap a pu jouer (mais tardivement) dans l'épistémologie du biophysicien est le fait que Rashevsky, pour le titre de son premier article de 1934 dans *Philosophy of Science*, choisisse justement d'employer le même terme (« *Foundation* ») que Carnap dans son exposé cursif sur les « fondements » des diverses sciences, dont la biologie, et sur leur unité hypothétique autour de la physique[7]. Les premiers travaux de Rashevsky en tant que « biophysicien » remontent à la fin des années 1920. Donc ils paraissent bien avant les publications du second Carnap[8] sur la logique de la science. Mais, il se peut fort bien que Rashevsky ait été incité à philosopher tant par cette première traduction de Carnap que par les questions épistémologiques adressées par ses collègues à l'occasion de la création de *Philosophy of Science*. On sait par ailleurs que même si Carnap n'émigre aux Etats-Unis qu'en 1935 et notamment d'abord à l'endroit même où exerce Rashevsky, c'est-à-dire à l'Université de Chicago, sa réputation le précède toutefois d'un an, notamment à Harvard, grâce aux comptes-rendus élogieux que fait le jeune mathématicien et philosophe américain Williard van Orward Quine (né en 1908) à son retour de Vienne, notamment à propos de la *Logische Syntax der Sprache*[9].

Rappelons en effet qu'en cette année 1934, dans sa période pragoise et sous l'influence des travaux antérieurs de Frege, Whitehead, Russell et Wittgenstein, Carnap produit trois thèses au sujet de la science : 1- la science se distingue de la métaphysique car elle purifie son langage pour n'avoir à faire qu'à des énoncés sensés c'est-à-dire vérifiables empiriquement[10] ; 2- ce critère de vérifiabilité par l'observation donne à son tour un rôle de fondement à la science des observables physiques qu'est la science physique elle-même ; 3- enfin, de par ce travail commun de purification de la langue et de fondation physique, toutes les sciences tendent à s'unifier sous les concepts et les méthodes de la physique[11]. Ainsi lit-on dans *The unity of science* :

---

[1] [Rashevsky, N., 1934a], pp. 183-189.
[2] [Rashevsky, N., 1934a], pp. 193-194 et [Rashevsky, N., 1934b], *in extenso*.
[3] [Rashevsky, N., 1935b].
[4] "*in abstracto* systems", [Rashevsky, N., 1935b], p. 419.
[5] [Carnap, R., 1934].
[6] [Carnap, R., 1934, 1937, 2002].
[7] Voir [Carnap, R., 1934], pp. 17-19.
[8] La *Construction logique du monde* remonte à 1928, mais les ouvrages vraiment fondateurs du positivisme logique et de sa réflexion sur la science que sont *L'unité de la science* et *La syntaxe logique du langage* ne paraîtront qu'à partir de 1934 et d'abord en allemand. Il est possible cependant que Rashevsky les ait lus rapidement car, étant originaire d'Europe centrale, il lisait l'allemand. Il est toutefois plus vraisemblable qu'il ait lu le condensé que Carnap en avait tiré la même année pour la revue américaine *Philosophy of Science.*
[9] Voir [Laugier, S., 2001], p. 12.
[10] Voir l'article « positivisme logique » de [Nadeau, R., 1999], p. 494.
[11] "Hence the thesis of Physicalism leads to the thesis of *the unity of science*", [Carnap, R., 1932, 1934, 1995], p. 96. C'est l'auteur qui souligne. Voir également *ibid*., § 7, pp. 93-101.

« Parce que le langage physique[1] *est ainsi le langage de base de la* Science, la totalité de la Science devient la Physique*. On ne doit pas comprendre cela comme s'il était d'ores et déjà certain que le système actuel des lois physiques suffit à expliquer tous les phénomènes. Cela signifie que tout énoncé scientifique peut être interprété, en principe, comme un énoncé physique, c'est-à-dire qu'il peut être amené sous une forme telle qu'il établit des corrélations entre une certaine valeur numérique (ou un intervalle, ou une distribution de probabilité de valeur) d'un coefficient d'état et un ensemble de valeurs de coordonnées de position (ou sous la forme d'un complexe d'énoncés de ce genre). »*[2]

Comme nous l'avons vu, ce propos réductionniste, unitaire, plutôt physicaliste donc, mais non naïvement mécaniste[3], est à peu près identique à celui que tient Rashevsky à partir de 1934[4]. S'il est possible que Rashevsky en ait eu par avance connaissance à travers le court résumé qui paraît dans *Philosophy of Science*[5], il faut néanmoins remarquer qu'il fait surtout écho au deuxième et au troisième points de la thèse de Carnap : la possible et même la désirable unification de toutes les sciences, et en particulier la biologie[6], sous le sceau réducteur de la physique et de ses lois. Il semble moins sensible en revanche à la problématique de la purification du langage dans les savoirs et dans les sciences spécifiquement. Alors que Carnap y voit le moyen pour la biologie de sortir de la fausse opposition entre vitalisme et mécanisme dont il perçoit une recrudescence dans ces années 1930[7], pour le biophysicien et scientifique praticien que revendique d'être Rashevsky, cette problématique purement philosophique ne le touche guère alors qu'il est en revanche directement intéressé pour le sens de son travail par l'appropriation et la radicalisation de la thèse réductionniste. Voici ce qu'il indique au sujet de la controverse du mécanisme et du vitalisme :

« Le lecteur aura remarqué, non sans surprise peut-être, que tout au long de cet article, nous n'avons pas une fois utilisé les mots de mécanisme et de vitalisme. Tous les résultats précédents [sur la croissance, la division et l'irritabilité de la cellule], aussi bien que tous ceux à venir, ne sont pas le moins du monde affectés par l'issue de la controverse du mécanisme contre le vitalisme. Jusqu'à présent, nous n'avons trouvé aucun phénomène dans la biologie qui se montrerait entièrement réfractaire à une interprétation physique. Mais il se peut qu'un jour nous en trouvions un. Quand cela arriverait, nous devrions observer et discuter la situation. Toutes les discussions a priori *basées sur des anticipations sont une perte de temps. Dans la mesure où* tous *les organismes sont constitués d'atomes, tout en eux est en fin de compte réductible à une*

---

[1] Cette expression « langage physique » désigne le langage scientifique une fois qu'il a été rendu conforme à la thèse physicaliste. Voir [Carnap, R., 1932, 1934, 1995], p. 95. Le terme « physicalisme » lui-même venait d'une proposition d'Otto Neurath, *ibid*., p. 28.

[2] "Because the physical language is thus the basic language of *Science the whole of Science becomes Physics*. That is not to be understood as if it were already certain that the present system of physical laws is sufficient to explain all phenomena. It means every scientific statement can be interpreted, in principle, as a physical statement, i.e. it can be brought into such a form that it correlates a certain numerical value (or interval, or probability distribution of values) of a coefficient of state to a set of values of position coordinates ", [Carnap, R., 1932, 1934, 1995], pp. 97-98. C'est l'auteur qui souligne.

[3] Bien que, comme on peut le voir, Carnap semble donner un rôle essentiel à une vision encore mécaniste, quoique éventuellement statistique, de l'espace et du temps physiques, il fait tout de même droit par ailleurs à la physique quantique. C'est même à elle qu'il fait allusion lorsqu'il ajoute entre parenthèse « ou une distribution de probabilité de valeurs ». Voir sur ce point précis [Carnap, R., 1932, 1934, 1995], pp. 99-100. La théorie de la relativité semble en revanche une référence nettement moins présente.

[4] Voir la citation précédente de Rashevsky.

[5] [Carnap, R., 1934].

[6] Voir [Carnap, R., 1932, 1934, 1995], p. 70.

[7] Voir [Carnap, R., 1932, 1934, 1995], pp. 68-69.

description en termes d'atomes, leurs agrégats et leur interaction. Il pourrait bien arriver que les lois de l'interaction atomique, telles qu'elles sont données par notre physique atomique actuelle, se révèlent inadéquates pour expliquer tous les phénomènes biologiques. Dès lors, ces lois auraient simplement à être révisées. Un mécaniste appellera cela une généralisation de la physique qui permet à cette dernière d'inclure la biologie. Un vitaliste appellera cela un échec de la physique et un triomphe du vitalisme. Nous ne savons pas si tout cela signifie grand-chose. »[1]

Ainsi, pour Rashevsky, la valeur de la biophysique ne dépend nullement de la résolution de cette controverse. Car son dessein n'est pas d'imposer des bornes *a priori* à la biologie. L'intérêt de Rashevsky pour la biophysique n'est pas non plus d'ordre philosophique au sens de Carnap, c'est-à-dire au sens d'un travail préliminaire de clarification de la langue biologique. Rashevsky ne fait que rappeler la nature de faux problème de la controverse mécanisme-vitalisme. Mais sans s'y attarder. Il est bien davantage concerné par le projet d'ouvrir à la biologie la voie de l'exactitude. L'enjeu urgent de la biophysique, selon lui, est de faire entrer la biologie dans le cercle fermé des « sciences exactes »[2].

La période des essais tous azimuts

Dans ce contexte intellectuel, dès le milieu des années 1930, Rashevsky s'essaye donc à de multiples formulations théoriques touchant pratiquement à tous les domaines de la biologie. Très fréquemment, dans des publications dont chacune se présente délibérément comme autant d'éventuel article *princeps*, il conçoit quelque chose comme le « plan de campagne »[3] d'une guerre qui tourne finalement en guérilla du fait de harcèlements formalistes divers tout à la fois inchoatifs et répétés. Ainsi tout semble indiquer que Rashevsky et ses collègues ont d'abord choisi de produire des essais de formalisation multiples et tous azimuts face à une biologie récalcitrante et d'apparence réfractaire à toute mathématisation triviale. C'est bien là une des grandes différences entre la biologie physicaliste des formes de d'Arcy Thompson et la biophysique de l'école de Rashevsky. Lorsque l'on se penche sur ses publications, on est en effet frappé de la diversité des formalismes qu'inlassablement elle propose d'introduire en biologie. Entre les années 1934 et 1954, c'est-à-dire de la reprise du terme « biophysique » à son article-tournant « Topology and life », Rashevsky se représente la biophysique et la biologie mathématique explicative comme tout à fait assimilables l'une à l'autre. La biologie qui veut se mathématiser n'a pas d'autres choix que de s'appuyer sur la physique et donc sur les méthodes et les concepts de la physique dans la

[1] "The reader will have noticed perhaps not without surprise, that throughout this paper we have not once used the words mechanism and vitalism. All the above results, as well as all those to come, are not in the least affected by the outcome of the mechanism versus vitalism controversy. So far we have not found in biology any phenomenon that would prove entirely refractory to a physical interpretation. But some day we may perhaps find one. When this occurs, we shall see and discuss the situation. Any *a priori* discussions, based on anticipations are waste of time. Inasmuch as *all* organisms are built of atoms, everything in them is ultimately reducible to description in terms of atoms, their aggregates and interaction. It may well happen that the laws of atomic interaction, given by our present atomic physics, may not be adequate to explain all biological phenomena. Then these laws have to be revised. A mechanist will call that a generalization of physics, which enables the latter to include biology. A vitalist will call it a failure of physics and a triumph of vitalism. Whether that means much, we do not know", [Rashevsky, N., 1934a], pp. 195-196. C'est l'auteur qui souligne.

[2] [Rashevsky, N., 1934a], p. 196.

[3] "Nevertheless, at every stage of development of a science, when we have before us a vista of unsolved problems, it is useful, and perhaps even necessary, to consider, so to speak, *the general plan of campaign in attacking those problems*", [Rashevsky, N., 1938; 1948], p. 569. C'est nous qui soulignons. Mais Rashevsky a en fait multiplié ces « plans » généraux et ces déclarations d'intentions. Si bien que pour reprendre le ton martial de sa citation, nous proposerons d'interpréter son travail comme quelque chose qui pourrait s'apparenter à une guérilla de théorisation menée contre la complexité des phénomènes biologiques.

mesure où ses objets ne sont pas essentiellement d'une autre nature que ceux de cette dernière. Si l'on veut reprendre ici la distinction opérée plus tard par le philosophe des sciences Carl Hempel[1], Rashevsky a bien dans l'idée de produire en biologie une « réduction des lois ». Mais, si l'on suit en cela la même rigueur logiciste que Hempel, cette réduction des lois biologiques à des lois physiques devra selon lui tout de même passer par des énoncés connecteurs entre termes biologiques et termes physiques. Or, Hempel montrera que ces énoncés connecteurs n'ont pas à avoir nécessairement la force logique d'une totale équivalence extensionnelle entre ce que désigne les termes biologiques et ce que désigne les termes physico-chimiques correspondants. Mais même si la réduction des lois n'implique pas la réduction des termes, Rashevsky semble de son côté espérer une telle réduction des termes[2].

Ce n'est pas, comme nous l'avons dit, qu'il pense pouvoir réduire *immédiatement* la biologie à la physique existante de son temps. Il voit au-delà du présent de la physique et envisage au contraire que la physique trouve là, à l'avenir, des termes et des lois qui lui seront toujours propres mais qui lui ont jusqu'à présent échappé du fait de son cheminement trop longtemps solitaire et séparé de celui de la biologie. La biologie théorique doit donc se formaliser *comme* la physique, de la même manière qu'elle, mais pas nécessairement *sur* la physique déjà connue. La biologie théorique doit être ainsi l'occasion pour la physique d'étendre ses propres vues théoriques puisqu'il n'y a pas de différence de nature fondamentale entre les phénomènes inertes et les phénomènes vivants. L'étude de la biologie théorique devrait être une occasion d'étendre ses principes pour la physique. C'est pourquoi la première épistémologie de la biologie théorique de Rashevsky ne peut totalement être assimilée à un naïf réductionnisme. Car pour qu'il y ait « réduction » au sens courant, il faut que l'on ramène de l'inconnu complexe à du connu élémentaire. Alors qu'ici, Rashevsky projette que l'on fasse des essais tous azimuts pour réduire l'inconnu complexe à du non encore connu élémentaire. Toutefois, nous verrons que cette première épistémologie de Rashevsky subira un infléchissement de poids par la suite. Même s'il est toujours resté essentiellement un théoricien, il a donc fait évoluer ses principes ; nous nous interrogerons plus bas sur les raisons de cette inflexion. Il est cependant un point sur lequel son avis n'a pas varié, c'est sur la question du rapport que doit entretenir la biologie théorique à la biologie quantifiée ou biométrie. Il a toujours reconnu que les expérimentateurs occupaient une place de choix dans la biologie mais, dans certains textes, il ne peut s'empêcher de leur donner un rôle ancillaire par rapport à la biophysique[3] qu'il appelle de ses vœux. Il avouait en effet lui-même être bien en peine pour trouver des cas précis pouvant illustrer concrètement ses multiples hypothèses théoriques. Aussi, se piquait-il d'avoir chaque matin une hypothèse théorique nouvelle à mettre en œuvre mais sans pour autant avoir la moindre idée du matériel biologique susceptible de la corroborer quantitativement ![4]

---

[1] [Hempel, C., 1966, 1972], pp. 157-165.

[2] Ce qui semble, là aussi, confirmer la proximité de son épistémologie avec celle du Carnap de 1934 : "It means every scientific fact can be interpreted as a physical fact, i. e. as a quantitatively determinable property of a spatio-temporal position (or as a complex of such properties)", [Carnap, R., 1932, 1934, 1995], p. 98.

[3] "The mathematical biologist establishes some hypothesis about the mechanisms of different biological phenomena and develops, on the basis of this hypothesis, mathematical theories […] As defined above, mathematical biology does not include such sciences as biometry or biostatistics. Yet those important sciences deal also with applications of mathematics to biology. Biometry and biostatistics are, however, not directly concerned with the development of mathematical theories of various biological phenomena. They deal with the statistical evaluation of observational and experimental facts. Biometry and biostatistics form an important bridge between experimental biology and mathematical or theoretical biology. The former supply to the latter the necessary facts in a quantitative form", [Rashevsky, N., 1960a], pp. 140-141.

[4] Voir [Legay, J.-M. et Varenne, F., 2001], p. 7.

Ainsi le mot d'ordre qui semble devoir caractériser les premiers travaux de Rashevsky pourrait être : multiplier, diversifier les points de vue formels, essayer des formalismes nouveaux et voir ce que l'on peut en tirer. Ce mot d'ordre repose sur une croyance dans le fait que la seule solution pour qu'une science devienne exacte réside dans sa théorisation mathématique sous une forme abstractive, comme la physique en a montré maints exemples. Ainsi, comme la théorisation mathématique n'a plus à rendre immédiatement des comptes à la réalité, il n'y a pas de guides *a priori* certain pour une telle mathématisation. Cela fait donc partie d'une stratégie tout à fait rationnelle, en tout cas cohérente et réfléchie, que de multiplier les tentatives de théorisation mathématique :

« Une caractéristique de la méthode mathématique est qu'elle est appliquée aux problèmes scientifiques par pure considération pour elle-même et sans que l'on ait égard au fait qu'elle entretienne un contact immédiat avec la réalité. Tôt ou tard, le contact peut, ou non, advenir ; mais la valeur d'une investigation mathématique n'en est pas affectée. Un problème mathématique individuel dans un champ donné peut ne jamais contribuer à une vérification expérimentale. Mais le système entier des études mathématiques du champ en question y contribuera sans aucun doute. Un traitement mathématique 'expérimentalement sans utilité' peut être un prérequis pour un autre qui a plus de contact avec la réalité. »[1]

Rappeler cela, c'est bien marquer déjà la nette différence d'avec la génération des d'Arcy Thompson ou même des Volterra ou des Lotka. Avec l'idée cette fois-ci bien claire et assumée que la biologie mathématique et théorique est dans ses commencements, Rashevsky s'autorise à faire flèche de tout bois. Il semble parier sur des formalisations, parfois juste le temps d'un article. C'est qu'il est en recherche de *la meilleure théorie mathématique*. Il ne faudrait en effet surtout pas interpréter cette approche par des formalisations tous azimuts comme le signe d'une acceptation par avance de la diversité et de la dispersion des points de vue formels, c'est-à-dire des modèles, sur un même sujet. D'ailleurs, très significativement, jusqu'en 1960, le terme de « modèle » ne s'impose pas à lui alors qu'il se répand déjà depuis longtemps dans de nombreux autres secteurs de la recherche en biologie comme la biométrie et la dynamique des populations.

De la mécanique de la cellule à la forme complexe des métazoaires

Mais venons-en à la problématique de la forme des organismes supérieurs telle qu'elle émerge au milieu des années 1940, dans les travaux de Rashevsky. C'est certes dans le cadre d'une épistémologie avant tout physicaliste que Rashevsky publie entre 1944 et 1948[2] ses premiers travaux biophysiques sur la forme des plantes. Mais s'intéresser à la forme des êtres vivants métazoaires suppose de passer de la physique de la cellule à la physique des agrégats de cellules ; ce qui tend à poser au biologiste théoricien des questions méthodologiques nouvelles.

Le plan du maître-livre de Rashevsky est organisé de manière à présenter dans ses premiers chapitres les théories biophysiques du métabolisme de la cellule et de son rapport aux

[1] "A characteristic of mathematical method is that it is applied to scientific problems for its own sake, regardless of immediate contact with reality. The contact may or may not come sooner or later ; but the value of a mathematical investigation is not affected. An individual mathematical problem in a given field may never contribute to an experimental verification. But the whole system of mathematical studies in the field in question will undoubtedly do so. An 'experimentally useless' mathematical treatment may be a prerequisite to another one, which has more contact with reality", [Rashevsky, N., 1934a], p. 180.
[2] [Rashevsky, N., 1938, 1948], p. 579.

événements qui peuvent lui arriver comme la mitose par exemple. On se souvient en effet que c'est par ces travaux sur la cellule que Rashevsky avait commencé ses propres recherches biophysiques. Et c'est seulement à la fin de l'ouvrage que, en toute cohérence avec son approche constructiviste-physicaliste (passer de la formalisation de la morphogenèse de l'organisme le plus simple à celle du plus complexe), se pose la question de la biophysique de l'organisme traité « comme un tout »[1]. Or, c'est là que se posent les problèmes de la forme et de la croissance dans la mesure où ils contribuent à une première réévaluation de l'épistémologie initiale.

Revenons rapidement sur l'esprit de l'ouvrage pour saisir quels sont ces premiers obstacles que la première épistémologie physicaliste de Rashevsky rencontre justement avec ces questions de forme et de croissance. Nous verrons ainsi qu'avant même de faire évoluer son approche générale vers une épistémologie plus mathématiste et formaliste (2ème version de son épistémologie), ce sera déjà au contact avec ces questions plus précises de forme et de croissance que Rashevsky devra quelque peu amender son projet d'une biophysique unifiée autour d'un fondement commun. Là aussi, nous verrons que Rashevsky n'est pas insensible à ses échecs en matière de théorisation, même s'il n'en tirera toujours pas l'idée qu'il faut se cantonner à modéliser fictivement les phénomènes.

Il faut avoir tout d'abord à l'esprit que, dans la droite ligne des premiers résultats sur la mécanique de croissance de la cellule, le fil directeur biophysique de l'ouvrage est la notion de « métabolisme » : selon Rashevsky, que l'on ait affaire à une seule cellule ou à un être multicellulaire, il est important de comprendre que l'on est toujours en présence d'un être qui « métabolise », c'est-à-dire qui voit en permanence entrer en lui et sortir de lui différents flux de substances diverses[2]. Au début des années 1940, après son premier relatif succès, il paraît donc tout à fait légitime à Rashevsky d'orienter ses efforts vers l'explication également métabolique de la mise en place des formes propres aux métazoaires, c'est-à-dire aux plantes et aux animaux. Or c'est bien là que l'approche biophysique métabolique rencontre un premier obstacle manifeste en plus des réticences de ses collègues généticiens et cytologistes qu'il avait déjà essuyées, notamment à l'occasion du premier Symposium de *Cold Spring Harbor* sur la Biologie Quantitative, en 1934[3]. Face à la « complexité »[4] des interactions présentes à cette échelle-là du vivant, l'approche par réduction à des éléments physiques et à leurs lois paraît « en pratique » impossible à terme :

---

[1] Pour le titre de ce dernier chapitre de l'édition de 1948, Rashevsky reprend explicitement l'idée à Lotka (et donc, implicitement, à Loeb) et en tire cette expression : "The Organism as a Whole and the Organic World as a Whole". Voir [Rashevsky, N., 1938, 1948], p. 437. De façon selon nous significative, à aucun moment, il ne se réfère en revanche au livre de Loeb. On peut imaginer que le mécanicisme réducteur de Loeb ne convient désormais aucunement à Rashevsky, même s'il est impossible qu'il l'ignore. Loeb avait en effet professé quelques décennies avant lui à l'Université de Chicago.

[2] Il confirmera cette approche toute sa vie. Ainsi en 1960, écrit-il encore : "There is one phenomenon which is always present when life manifests itself. That is metabolism. Every living cell metabolises an number of substances, which flow into it and out of it. Death is always accompanied by a cessation of metabolism. True enough, dormant spores do not metabolise, though they are alive. But until a spore is put into a milieu in which it begins to proliferate, there is also no way of telling whether it is dead or alive. A proliferation is always accompanied by metabolism. Thus metabolism is always present when and only when life *manifests* itself. It was therefore natural to look for a possible connection between metabolic processes and cell division", [Rashevsky, N., 1960b], pp. 141-142.

[3] Evelyn Fox Keller rappelle la teneur de la critique principale adressée à Rashevsky par le biologiste et statisticien d'Harvard, Edwin Bidwell Wilson, lors de ce symposium : les mathématiques ne peuvent servir en biologie qu'au niveau des populations, non au niveau des individus. Voir [Keller, E. F., 2002, 2003], p. 86. Wilson conteste donc la valeur du travail de Rashevsky, y compris à l'échelle de la cellule, c'est-à-dire dès son départ.

[4] C'est bien le terme « complexity » qu'emploie à plusieurs reprises Rashevsky. Voir [Rashevsky, N., 1938, 1948], p. 570 et p. 571.

« En principe, le développement des approches suggérées devrait bien nous conduire à la solution du problème. En pratique *cependant, comme il est aisé de le voir dès maintenant, nous irons bientôt au devant de difficultés insurmontables si nous essayons, même avec les approximations actuelles, d'étendre le traitement des forces métaboliques à des formes d'une complexité comparable à celle qu'offrent divers organismes. Toute sursimplification du problème doit avoir une limite au delà de laquelle le problème devient complètement distordu et irréaliste ; et une simplification supplémentaire de l'actuelle 'méthode d'approximation' passerait probablement outre cette limite. Il faut faire quelque chose d'autre. »*[1]

La méthode de la théorisation mathématique abstractive par réduction à la physique ne peut donc pas valoir dans les cas où les interactions sont trop complexes. Si « en principe » cette méthode est toujours bonne, « en pratique » elle ne l'est pas toujours car la méthode de réduction exige toujours une idéalisation[2] des éléments en interactions, idéalisation qui risque de créer des « distorsions » intolérables dans le cas où l'on a un très grand nombre d'éléments hétérogènes en interaction. En cette fin des années 1940, Rashevsky aperçoit donc clairement que, pour des raisons d'impossibilité *pratique* dans le traitement des calculs, on ne peut pas, pour le moment, proposer des théories mathématisées de la morphologie et de l'embryologie qui soient en même temps fondées sur des idéalisations censées représenter des éléments physiques ou chimiques concrets en interaction. L'approche par la réduction suppose en effet que la reconstruction à partir des éléments soit ensuite faisable. En pratique, cette approche ne semble donc pas la bonne dans le cas de l'embryologie et de la morphologie mathématiques. À titre d'illustration et pour faire contraste, Rashevsky prend pour exemple un secteur de la biophysique qui, malgré la complexité de ses interactions, continue en revanche à bien accepter la méthode par réduction aux éléments physiques idéalisés : c'est le domaine de la biophysique mathématique du système nerveux central[3]. Dans ce cadre-là, en effet, même si l'on a affaire à diverses équations différentielles particulières exprimant chacune de façon idéalisée un type d'interaction, « l'étude de circuits de plus en plus complexes, et auxquels on applique les équations formelles et phénoménologiques, offre toujours des possibilités presque illimitées »[4]. Or, c'est précisément le traitement combiné de ces idéalisations valant à l'échelle de l'élément mécanique qui est rendu pratiquement impossible dans le cas des problèmes macroscopiques de forme et de croissance.

---

[1] "In principle, the development of those suggested approaches should well lead us to the solution of the problem. *Practically*, however, as it is easy to see even now, we shall soon run into almost insuperable difficulties if we try to extend even the present approximate treatment of the metabolic forces to such complex shapes as are offered by various organisms. Any oversimplification of the problem must have a limit, beyond which the problem becomes completely distorted and unreal and a further simplification of the present 'approximate method' would likely exceed that limit. Something else must be done", [Rashevsky, N., 1938, 1948], p. 570. C'est l'auteur qui souligne.

[2] Depuis les premiers temps de son travail de recherche, Rashevsky a en effet conscience que pour qu'une biophysique joue à l'égard de la biologie mathématique le même rôle que celui que joue la physique statistique à l'égard de la thermodynamique, il faut qu'elle recourt elle aussi à des éléments en interaction certes, mais surtout à des éléments suffisamment standardisés et simplifiés dans notre représentation pour que l'on puisse justement abréger la représentation de leurs interactions, c'est-à-dire pour que l'on puisse faire des calculs. Voir [Rashevsky, N., 1938, 1948], p. x. C'est ce que fait la physique statistique, rappelle-t-il, avec la fiction des « balles élastiques » pour la représentation des molécules de gaz.

[3] Il faut rappeler que l'on ne se trouve ici que quelque temps après la publication en 1943 (par Rashevsky lui-même dans le *Bulletin of Mathematical Biophysics*) de l'article fondateur de Pitts et McCulloch [McCulloch, W. S. and Pitts, W., 1943]. Or, aux yeux de Rashevsky, l'approche discrétisée qui y est adoptée n'a pas encore remis profondément en question les classiques théories électriques (continuistes et au formalisme intégro-différentiel) de l'influx nerveux telles qu'il les avait aussi développées lui-même entre 1929 et 1934. Voir [Rashevsky, N., 1934a], p. 419.

[4] [Rashevsky, N., 1938, 1948], p. 570. Dans les années 1940, l'électrophysiologie est alors le lieu de prédilection des modèles analogiques de type électrique car ils permettent de modéliser analogiquement la coexistence et le couplage d'équations différentielles simultanées.

La proposition de « principes formels et généraux »

Toutefois, devant une telle difficulté, Rashevsky ne cède pas aux instances de ses collègues biométriciens qui renoncent quant à eux à aborder conceptuellement une telle complexité sans s'être auparavant dotés de faits empiriques, c'est-à-dire de données statistiques en grand nombre[1]. Rashevsky ne veut rien céder à la modélisation statistique de ce point de vue-là : elle ne peut se prévaloir d'aucune priorité, selon lui, dans le travail scientifique. Fidèle à sa perspective essentiellement favorable à l'initiative théorique, il entrevoit donc plutôt une solution de nature méthodologique et conceptuelle. Il pense que l'exemple du développement de la physique sous sa forme mathématisée peut encore rendre un grand service à la biologie mathématique naissante, mais d'une autre manière que précédemment. Et voici comment :

*« Des situations de cette nature ne sont pas étrangères au physicien. Ce dernier ne doute pas que même les phénomènes mécaniques ou électromécaniques les plus complexes sont en définitive réductibles aux activités des atomes individuels. Néanmoins, dans l'étude d'un circuit électrique complexe, par exemple, un physicien n'a pas recours à la théorie de l'électron mais il utilise quelque principe formel et général dans ses calculs [*computations*]. C'est assez vrai qu'aujourd'hui on peut montrer que presque tous les principes formels de ce type sont déductibles de la théorie atomique. Mais il y a eu un temps où cela n'était pas connu et ces principes étaient utilisés avec autant de sûreté. Comme exemples, on peut rappeler à son esprit la théorie de la conduction de la chaleur de Fourier, la loi d'Ohm, etc. »*[2]

À l'instar de cette physique qui fut momentanément phénoménologique dans ses lois, Rashevsky propose donc d'introduire également des *principes formels* dans la biologie mathématique, « sans préjudice, *pour le moment*, de leur réductibilité aux principes utilisés jusqu'à présent »[3]. Ces principes généraux et formels doivent en effet être bien distingués des précédents qui avaient cours lorsque l'on idéalisait les éléments physiques en simplifiant leur représentation. Pour les distinguer des nouveaux, ces anciens principes doivent être appelés « physiques ». Même s'ils reposent sur des idéalisations, ils sont réputés « moins formels par nature »[4] que les principes généraux nouvellement promus pour le règlement de ces questions de forme. Les deux types de principes, ajoute Rashevsky, restent toutefois foncièrement « compatibles ».

En fait cette proposition nouvelle dans l'épistémologie rashevskyenne est censée servir deux objectifs distincts. Le premier, le plus important, est de nature pratique. Il s'agit de rendre les théories calculables *en pratique* donc susceptibles de servir à des prédictions explicites. Car c'est

---

[1] Voir la citation d'Eric Ponder (1898-1970), professeur de physiologie générale au *Washington Square College*, extraite par Evelyn Fox Keller des actes du Symposium de Cold Spring Harbor de 1934 sur la Biologie Quantitative : "There is an unfortunate confusion at the present time between quantitative biology and bio-mathematics […] Until quantitative measurements has provided us with more facts of biology, I prefer the former science to the latter", [Keller, E. F., 2002, 2003], p. 87. Ponder qualifie donc de « bio-mathématique » l'approche de Rashevsky. Pour lui, l'urgence est dans l'accumulation de faits expérimentaux et l'analyse statistique est là pour servir ce projet.

[2] "Situations of that nature are not unfamiliar to the physicist. The latter does not doubt that even the most complex mechanical or electromechanical phenomena are ultimately reducible to activities of individual atoms. Nevertheless, in studying, for instance, a complex electric circuit, a physicist does not fall back on the equations of the electron theory but uses some general *formal* principles in his computations. It is quite true that at present almost all such principles can be shown directly to be deducible from atomic theory. But there was a time where this was not known, and yet those formal principles were used just as safely. We may be reminded, by way of exempla, of Fourier's theory of heat conduction, Ohm's law, etc.", [Rashevsky, N., 1938, 1948], p. 571. C'est l'auteur qui souligne.

[3] "regardless *at present* of their reducibility to the principles used hitherto", [Rashevsky, N., 1938, 1948], p. 571. C'est l'auteur qui souligne.

[4] "less formal in nature", [Rashevsky, N., 1938, 1948], p. 571.

seulement à cette condition que toute théorie nouvelle se prêtera à des comparaisons avec d'autres théories mais aussi, à terme, avec l'expérience. Le second objectif est de nature plus heuristique : « l'introduction de principes formels [en biologie mathématique] ouvre néanmoins à de nouveaux horizons, jusque là inaperçus »[1]. Ainsi, les styles de formalisations qui étaient fortement contraints par le passé de la physique mathématique, et plus particulièrement de la mécanique rationnelle, vont pouvoir s'émanciper et s'aventurer dans cet horizon nouvellement dégagé. Sans que Rashevsky l'exprime ainsi, cette épistémologie spéciale, à visée « pratique » et recourant à des principes formels (à l'échelle méso- ou macroscopique), installe en fait un troisième niveau, ou horizon, de considérations formelles dans une épistémologie générale d'orientation au départ réductionniste ou, à tout le moins, physicaliste.

De deux à trois horizons de formalisation : insérer des principes intermédiaires

À la fin des années 1940, l'épistémologie de transition de Rashevsky est donc à trois étages, si l'on peut dire. Il y d'abord le niveau physique qui se prête à théorisation dans la mesure où les éléments physiques sont simplifiés et idéalisés, comme dans la physique statistique. C'était le premier objectif principal de la biophysique, rappelons-le : réduire les concepts biologiques pour que la biologie théorique puisse devenir la physique statistique d'une biologie mathématique globaliste de type dynamique des populations. Cette approche formelle globaliste et qualitative[2] formait pour sa part le second et dernier niveau de formalisation. Il y avait là également place pour une formalisation et une idéalisation, mais d'un autre type dans la mesure où il n'y était nullement tenu compte de la réalité physique intrinsèque et propre aux éléments ou acteurs en interactions. Les hypothèses simplificatrices étaient essentiellement de nature relationnelle[3] même si, de fait, elles retombaient commodément dans le formalisme de la mécanique rationnelle. Dans les usages traditionnels des équations différentielles de la mécanique rationnelle, à la différence de la dynamique des populations, on fait d'ordinaire davantage que se représenter des relations entre les éléments. On se représente également des propriétés intrinsèques quantifiables, comme des élasticités par exemple, ainsi que le montre le modèle physique des balles élastiques. Avant de recourir aux équations, on se représente donc des attributs matériels, certes idéalisés, mais supposés être essentiels à l'élément individuel et comme logés *en* lui. Au contraire, cet accent sur

[1] [Rashevsky, N., 1938, 1948], p. 571. Notre traduction.

[2] Sur ce point, Volterra s'inscrivait dans une approche qualitative (plus précisément dans cette partie de la topologie naissante, issue de l'analyse fonctionnelle et de la géométrie différentielle) et dont il faisait de Poincaré l'initiateur : « Cette étude repose sur celle des intégrales de certaines équations différentielles et intégro-différentielles, qu'il faut examiner très en détail, soit d'une manière quantitative, soit, bien souvent, d'une manière seulement qualitative. Je tiens à rendre hommage à la mémoire de Henri Poincaré et à son génie, en rappelant combien il a insisté, dans certains de ses travaux classiques, sur le rôle que peut jouer dans la philosophie naturelle l'étude qualitative des intégrales des équations différentielles », [Volterra, V., 1931], pp. v-vi. C'est cette orientation délibérément qualitative qui illustre le mieux ce que nous appelons une approche globaliste.

[3] Les relations étaient réduites au minimum de façon à pouvoir appliquer le formalisme continuiste de la mécanique rationnelle : il s'agissait principalement d'un rapport de présence/absence exprimant des rapports de vie/mort ou de prolifération/consommation (lutte pour la vie). Dans ce cadre-là, la relation, bien qu'essentielle à la formalisation, est aussi très rudimentaire : présence ou absence de proies *devant les* prédateurs. Les tenants de ce qui s'appellera plus tard la « biologie relationnelle » (dont Robert Rosen), dès lors qu'ils seront influencés par des traditions d'esprit différentes (dont la théorie des automates mais aussi la topologie algébrique), ne seront d'ailleurs pas particulièrement sensibles à ce caractère relationnel déjà sous-jacent aux mathématisations de Volterra. Rappelons d'ailleurs que l'école mathématique de Volterra pâtira très vite du fait de n'avoir pris le tournant de la topologie algébrique en n'incorporant pas dans ses études la considération de l'espace de Hilbert. Voir sur ce point précis l'article de Jean Dieudonné *in* [Taton, R., 1964, 1995], p. 27. On ne doit donc pas considérer Volterra comme un instigateur de la « biologie relationnelle » à venir même si l'on peut le considérer comme un de ses précurseurs mais au risque de niveler les subtils déplacements historiques qu'ont subi les épistémologies à l'œuvre de l'époque. Ce sont ces déplacements et infléchissements qui nous intéressent ici.

les « associations »[1] biologiques, donc sur de pures relations, abstraction faites des qualités des substances qui y interviennent, pouvait logiquement conduire à de pures recherches mathématiques sur des systèmes d'équations différentielles. Ces recherches devaient ainsi pouvoir valoir en elles-mêmes, aux yeux des mathématiciens, comme le pensait déjà explicitement Volterra[2].

Il y a enfin le troisième niveau, ou horizon, de formalisation. C'est celui qui correspond aux nouveaux principes tout à la fois généraux et formels que Rashevsky veut introduire. Ces principes sont intermédiaires dans la mesure où, étant fonctionnels (c'est-à-dire représentant une « fonction » vitale comme le principe de la mobilité ou celui de la coordination nerveuse des animaux), ils sont tout à la fois purement intuitifs (ils sont pour ainsi dire « parachutés ») à un certain niveau macroscopique et proposés sans construction mécanistique préalable du formalisme, mais sans pour autant donner lieu à une mathématisation intégrale et d'un seul coup comme en dynamique des populations. Ils formalisent donc le nécessaire accomplissement d'une fonction biologique qui est propre aux métazoaires que l'on étudie. Selon Rashevsky, le métabolisme, en lui-même, ne constituait donc pas encore ce que l'on pourrait appeler une fonction biologique. Il est la description *a minima* de ce qui affecte mécanistiquement le vivant. Il en est tout autrement des principes formels qu'il propose d'introduire spécifiquement pour l'étude de la forme des métazoaires. C'est donc également en un autre sens que ces principes fonctionnels sont intermédiaires entre le niveau physique et le niveau mathématique de formalisation : ils sont en effet manifestement porteurs d'une *sorte de finalisme local* dont on doit bien s'accommoder pour des raisons de praticabilité de la théorie mathématique, comme nous l'avons vu.

Or, là est la clé d'une des inflexions progressives mais majeures du programme épistémologique issu des travaux de d'Arcy Thompson et de Lotka ou Volterrra dans les problématiques de morphogenèse. De façon décisive, Rashevsky introduit la notion de « fonction » dans sa biologie mathématique naguère exclusivement biophysique. Ce n'est pas cependant qu'il veuille se jeter à corps perdu dans un oubli des principes de formalisation qui d'ordinaire lui venaient de la mathématisation déjà bien avancée du substrat physique. Sa biophysique devient en fait une bio-« physique d'ingénieur » particulièrement sensible à l'*ergon*, à la « fonction » au sens d'Aristote, c'est-à-dire à la fonction supposée devoir se mettre en œuvre dans tel ou tel substrat biologique quand bien même ses éléments ultimes ne seraient que physiques. Le vivant, à ce niveau de formalisation, est de nouveau pensé comme un système de fonctions du même type que celles que doivent accomplir les outils et les artefacts des hommes. Inutile de dire que cette épistémologie fonctionnaliste n'est surprenante que par le contexte biophysique et réductionniste tardif où elle a fini par intervenir. Elle est tout ce qu'il y a de plus récurrent dans l'histoire des sciences de la vie. Elle rejoint en fait toute une tradition finaliste remontant au moins à Aristote et pour laquelle il faut concevoir les organes comme étant toujours déjà organisés pour accomplir une fonction. La fonction devient en effet première dans l'ordre causal, à la manière d'une cause finale[3].

---

[1] Selon le terme choisi par Volterra lui-même. Voir [Volterra, V., 1931], p. v.

[2] Volterra éprouvait même le besoin de préciser : « Cet ouvrage ne s'adresse pas aux seuls mathématiciens qui y verront des développements analytiques, mais aussi aux naturalistes qui y trouveront des lois biologiques », [Volterra, V., 1931], p. vi.

[3] Rappelons que, de façon polémique, Aristote s'était déjà attaqué à ceux qu'il appelait les physiologues, ces philosophes de la nature qui voulaient réduire la vie aux purs jeux mécaniques des quatre éléments et des configurations corporelles. Aussi, dans une perspective que nous pourrions qualifier de fonctionnaliste, attribuait-il la croissance des plantes à l'action fonctionnelle de l'âme nutritive : « Or nul n'a de sensation, qui n'ait point l'âme en partage. Et le cas de la croissance et du dépérissement est semblable. Car nul ne dépérit, ni ne croît dans l'ordre naturel, sans se nourrir. Or

Rashevsky ne dit pourtant mot de cette filiation conceptuelle classique car, comme la grande majorité des physiologistes du début du 20ème siècle, il lui suffit de faire implicitement fond sur la vulgate d'un finalisme local et uniquement méthodologique tel qu'il intervient chez un Claude Bernard par exemple. Mais ce qui est sûr, c'est qu'il ouvre effectivement un horizon de formalisation nouveau dans la biologie avec l'acceptation purement méthodologique de ces principes mathématiquement exprimables qui vont donc se révéler tout à la fois formels et biologiquement fonctionnels.

Application à la forme des animaux puis des plantes

À la fin des années 1940, pour traiter mathématiquement de la morphologie, Rashevsky ajoute donc ce qu'il appelle le principe des « systèmes métabolisants et propulsés par leviers »[1]. « Plus généralement, dit-il, on peut postuler que *la forme de tout organisme est déterminée par les conditions requises pour que certaines fonctions mécaniques et physiologiques soient mises en œuvre.* »[2] En effet, dans tout organisme animal ou végétal, en plus du métabolisme ou de l'éventuel principe de coordination nerveuse, il lui semble qu'il y a toujours cette fonction mécanique de levier (œuvrant à échelle macroscopique : ce qui la distingue donc bien des approches mécaniques et biophysiques réductrices antérieures) qui se manifeste. Là-dessus il n'avance aucune preuve dans la mesure où, comme nous l'avons dit, l'idée même de principe mathématisable intermédiaire nécessite de recourir davantage à la pure observation et à l'induction au niveau macroscopique plutôt qu'à des scénarios d'emblée analytiques et constructifs. Il ne s'agit donc aucunement d'un modèle fictif. Or, Rashevsky, fidèle à son point de vue unitaire, soutient que cette fonction de levier existe encore pour la plante même si son mouvement se réduit au repos, c'est-à-dire à un mouvement de vitesse nulle : lorsque l'on s'intéresse à la mathématisation de la forme des plantes, on peut donc rajouter le principe d'une statique globale aux équations habituelles rendant compte du métabolisme. C'est précisément ce qu'il fait dans le chapitre 49 de l'édition de 1948 et intitulé « Form of plants »[3].

---

nul ne se nourrit qui n'ait point part à la vie. Empédocle, au demeurant, a bien tort d'ajouter à ce propos que la croissance, chez les plantes, s'effectue vers le bas, selon l'enracinement, parce que la terre se porte naturellement dans cette direction, et vers le haut parce que le feu possède ce mouvement. Et, en fait, il n'a pas non plus une juste conception du haut et du bas, car le haut et le bas ne représentent pas la même chose pour tous les vivants que pour l'Univers ; au contraire, ce qui correspond à la tête des animaux, ce sont les racines des plantes, *s'il faut exprimer la différence et l'identité des organes d'après leurs fonctions* », *De Anima*, II, 4, 415b24 – 416a6, [Aristote, DA, 1993], p. 154. C'est nous qui soulignons. Par ailleurs, il existe un très grand nombre de textes où Aristote assimile les organes des êtres vivants (comme l'étymologie même du mot y prête naturellement) aux parties des êtres artificiels comme un outil ou un instrument de musique. Joseph Moreau, par exemple, résume très bien l'idée générale : « Dans la nature, comme dans l'art, c'est la finalité, la fonction, le service, qui détermine la forme des instruments, des outils et des organes ; c'est la fin qui exige les moyens ; la matière est informée par les fins », [Moreau, J., 1962, 1985], p. 164. D'autre part, rappelons que, dans ce cadre-là, Aristote avait très finement et clairement distingué *la fonction accomplie* par l'organisme, ou par l'outil achevé, de *la fonction qu'il faut accomplir* auparavant pour achever cet organisme ou cet outil. Avec Rashevsky, nous en sommes donc à la reconnaissance de ce point de distinction subtile, mais, ce qui est nouveau, au niveau même des capacités à formaliser : savoir que nous pouvons formaliser la *fonction générale accomplie* par l'organisme achevé (la motricité, la coordination nerveuse ou la résistance mécanique à la casse…) ne veut pas dire que l'on sache formaliser la *fonction qui a achevé* cet organisme jusqu'à ce qu'il déploie la configuration spatiale qui est devenue la sienne. Voir sur ce point la note de Richard Bodéüs : « Aristote veut dire qu'un corps naturel est à mettre sur le même pied qu'un corps artificiel quelconque, par exemple le hautbois. Or celui-ci en tant qu'instrument, a rapport avec l'art du musicien qui s'en sert, non avec celui du charpentier qui se sert d'une matière pour le fabriquer », [Aristote, DA., 1993], p. 113.

[1] "*lever-propelled metabolising systems*", [Rashevsky, N., 1938, 1948], p. 572. L'auteur souligne toute l'expression.

[2] "More generally we may postulate that *the shape of any organism is determined by the requirements of performing certain mechanical and physiological functions*", [Rashevsky, N., 1938, 1948], pp. 572-573. C'est l'auteur qui souligne.

[3] [Rashevsky, N., 1938, 1948], pp. 575-579.

Dans ce chapitre, fort de cette nouvelle autorisation qu'il s'est donnée de recourir à des principes formels à échelle méso- ou macroscopique, Rashevsky se contente de fournir certaines des équations aux dimensions qui lui paraissent plausibles en fonction de plusieurs de ces principes formels : 1- pour des raisons apparemment fonctionnelles le flux métabolique total est ainsi décrété proportionnel au nombre total de feuilles ; 2- la résistance à la casse des branches étant limitante, on peut en déduire l'allure du rapport entre le rayon des branches et leur longueur (c'est l'un ou l'autre cas : branche longue et étroite ou courte et épaisse, d'où deux types extrêmes de port moyen que Rashevsky dessine) ; 3- le flux total de métabolites est limité par le rayon du tronc et par ses propriétés de diffusion dont la densité ; 4- enfin, chaque branche reçoit en moyenne une fraction du flux métabolique correspondant au flux du tronc divisé par le nombre total de branches. Ainsi, sans nullement expliciter la source de ces relations algébriques, il relie tour à tour et les uns aux autres la masse d'un arbre, la longueur et le rayon de son tronc, la longueur et le rayon de ses branches du premier ordre (les autres ordres de branchaison sont négligés), le nombre total de branches, la densité moyenne du bois de l'arbre et la valeur de son métabolisme moyen. Il prévient que ces différentes équations aux dimensions donnent seulement des *allures* de comportement : il s'agit uniquement « d'une illustration de la méthode » et cela ne doit « pas nécessairement soutenir un quelconque rapport avec des cas réels »[1]. Cependant, pour finir, il propose une relation plus précise, bien que déterminée « grossièrement »[2] entre le flux métabolique dans le tronc de l'arbre et la section de ce tronc. Sans le justifier là non plus, il juge que ce flux doit être grossièrement proportionnel[3] à cette section, donc au carré du rayon. Il reprend en fait l'observation que Léonard de Vinci avait déjà rapportée dans ses carnets sur les sections des branches.

Des résultats pas entièrement en cohérence avec l'objectif initial

Le résultat de la mise en œuvre inchoative de cette méthode de formalisation mathématique nouvelle est que, de façon très curieuse, on assiste à un traitement massif et en parallèle de diverses relations de statuts différents et exprimant des principes fonctionnels hétérogènes. Cependant ces principes, dans leur diversité même, aussi bien que dans leurs traitements désordonnés et en parallèle, sont finalement rendus communicants entre eux. Donc ils peuvent amener à des systèmes d'équations solubles à la main dans la mesure où les formalismes simples[4] convoqués pour exprimer chacun d'entre eux ne sont autres, du point de vue axiomatique, que des formes algébriques polynomiales.

En en restant au niveau de l'*allure* des courbes de dépendance entre les variables, donc au niveau des comportements *moyens*, Rashevsky se dote ainsi d'une formalisation qui a le bon goût de permettre ensuite une combinaison, par le calcul, de ces dépendances fonctionnelles et de *franchir ainsi l'obstacle de la complexité*, ce qui était bien l'objectif de l'introduction de ce troisième horizon de formalisation : s'éloigner, être un peu plus myope à l'égard des phénomènes pour pouvoir continuer à en combiner mathématiquement les expressions formelles, c'est-à-dire, tout bonnement, pour pouvoir les amener à des calculs praticables et susceptibles d'ouvrir le formalisme à la comparaison avec l'empirie. Seulement, et c'est cela qui sonne ici comme un

[1] "The following is intended only as an illustration of the method and does not necessarily bear any relation to real cases", [Rashevsky, N., 1938, 1948], p. 576.
[2] "roughly", [Rashevsky, N., 1938, 1948], p. 577.
[3] Nous indiquons ce résultat plus précis puisqu'il aura par la suite une histoire à travers les écrits de biométriciens comme Jean-Marie Legay.
[4] Simples puisque partant d'intuitions au départ seulement qualitatives sur le fonctionnement global.

demi-échec, ou, en tout cas, comme un inachèvement, Rashevsky rappelle que son illustration n'est valable qu'en théorie et que l'on ne devrait justement pas la confronter à des données empiriques ! Le projet initial n'est donc que très partiellement réalisé, on le voit…

Dans la suite de nos propos, il nous faut donc suivre ce qu'un de ses élèves directs, David L. Cohn, propose pour le traitement de cette représentation mathématique et pour son application effective, notamment à la suite des travaux, précédemment évoqués, qui ont été menés par Rashevsky sur les « principes formels » et fonctionnels. En effet, de façon significative en ce début des années 1950, David Cohn, en poursuivant l'entreprise d'érosion interne du mouvement de recherche théorique en biophysique de la morphogenèse, insiste particulièrement sur la nécessité d'introduire non pas tant les principes de la physique générale en biologie mathématique que « les principes de l'ingénierie ». Là est son apport. Mais qu'entend-il par là ?

CHAPITRE 6 - La bio–« physique d'ingénieur » de David L. Cohn (1954)

David Lionel Cohn (né en 1927) appartient au *Committe on Mathematical Biology* de l'Université de Chicago, lorsqu'en 1953, il bénéficie d'un fond de recherche débloqué par le *National Heart Institute* lui-même membre des *National Institutes of Health* (NIH). En tant que biophysicien, il va se pencher sur la structure générale du système vasculaire chez les mammifères puisque son objectif est d'éclairer le fonctionnement optimal du cœur et son rapport à cette structure totale. Sa problématique est donc un peu différente de celle de Murray. Ce dernier ne considérait en effet que la structure locale des ramifications vasculaires. Le contexte scientifique auquel il appartient est également bien différent. C'est celui de la biophysique rashevskyenne. Cohn se voit donc obligé de reprendre en quelque manière les idées de Rashevsky sur la question. Mais ce qui est intéressant, c'est le fait qu'il utilise le chapitre du maître sur la « forme des plantes » pour en appliquer l'esprit à l'étude de la forme du système vasculaire. Le rapprochement de ces deux objets biologiques végétal et animal n'est bien sûr pas en soi nouveau. Ce qui l'est en revanche, c'est la façon dont il conçoit les notions de « fonction biologique » et d'exercice optimal de cette fonction que Rashevsky avait auparavant réhabilitées.

En effet, au début de son travail, Cohn distingue explicitement, et donc plus nettement que d'Arcy Thompson et Rashevsky ne l'avaient fait, les « déterminants génétiques » des « déterminants environnementaux » intervenant dans la mise en place de la forme des vivants. Son travail ne portera que sur les premiers. Mais cette précision est encore insuffisante. Il faut selon lui distinguer deux perspectives divergentes au sujet de ces déterminants génétiques. Pour les causes de la genèse des formes au niveau de l'individu (l'ontogenèse), à vouloir appliquer l'approche directement mécaniciste à la notion d'exercice optimal d'une fonction, on tombe clairement dans un problème inextricable puisque l'on est obligé de supposer que cette optimalité était déjà présente, « sous une forme latente »[1] dans les gènes de l'individu eux-mêmes. L'optimalité est déplacée vers les causes, sans doute avérées pour le moment mais non explicitées dans le détail, que sont les gènes : à effet optimal cause optimale pour ces effets. La recherche d'une représentation mathématique explicative de la forme optimale *via* les déterminants génétiques matériels que sont les gènes ne pourra pas se fonder sur ce sur quoi pourtant elle devrait en droit se fonder : les gènes. Car, entre les gènes et la biologie du développement, il n'y a bien sûr pas rupture de causalité *a priori*, au contraire, mais il y a plutôt un marécage de relations très complexes, encore très mal connues, non explicitées mathématiquement et qui rend donc pour le moment impraticable une telle approche de l'optimalité fonctionnelle de la forme au moyen d'une représentation idéalisée des gènes. Il faut donc clairement adopter une approche non analytique de l'optimalité et en rester à ce que la phylogénie nous a légué à travers les lents processus de sélection naturelle : il faut bien supposer dès le départ, comme Rashevsky le suggérait en 1948, que l'optimalité est là et qu'on ne peut en expliciter les causes actuelles. Cela ne veut pas dire que l'on ne puisse pas *partir* de ce principe de l'optimalité pour en tirer par un traitement mathématique des relations métriques, nominales en

[1] "The final form of the individual is present in latent form in the genetic makeup of the single cell from which development begins", [Cohn, L., 1954a], p. 62.

quelque sorte (au sens des cotes nominales du dessin d'ingénieur), et dues à l'exercice optimal des fonctions biologiques de l'organisme.

C'est pour cela que Cohn adopte en pleine conscience ce que nous avons appelé le niveau intermédiaire de formalisation, le niveau des formalismes fonctionnels, finalistes en quelque sorte, et ainsi délivrés de la nécessité d'une construction intégrale à partir des éléments causaux supposés. Mais sur ce point, il voit plus loin que Rashevsky puisqu'il propose avec insistance de passer à une approche de formalisation synthétique dont l'origine est moins directement formelle ou inspirée de la physique générale : sa méthode consiste à se proposer sur le papier un système combiné de fonctions mathématiques diverses de telle sorte que ce système soit dans son fonctionnement global analogue au système vivant étudié. C'est là que le modèle de la pratique de l'ingénieur s'impose naturellement à lui : le souci du fondement ontologique et explicatif ayant été momentanément écarté, on peut le remplacer par un souci plus grand d'adopter des méthodes de descriptions formelles qui soient plus pragmatiquement adaptées.

Un prise de conscience venant de l'embryologie chimique

Avant de revenir sur la mise en œuvre de cette méthode, quelque chose peut nous paraître surprenant et nous devons nous y arrêter. En effet, qu'est-ce qui a contribué au fait que Cohn a, plus encore que Rashevsky, le sentiment que la réduction directe aux éléments physiques constitutifs ne s'impose vraiment plus ? Nous allons risquer ici une hypothèse sur l'origine de cette inflexion dans le travail de Cohn par rapport à celui de Rashevsky. Lorsque l'on regarde le travail de Cohn, on est effectivement frappé de voir combien il veut à toutes forces s'inscrire en faux contre des techniques de mathématisation trop abstraites et à échelle trop globale telles que celle qui se manifeste, selon lui, dans la « théorie des transformations » de d'Arcy Thompson. Or, pour appuyer sa critique, il cite assez longuement un auteur qu'on ne voyait jusque là pas du tout paraître dans la littérature de l'école de Rashevsky. Il s'agit de l'embryologiste britannique Conrad Hal Waddington (1905-1975)[1].

Cohn ne semble pas avoir lu directement Waddington mais il le cite à travers un article de l'anatomiste britannique Solly Zuckerman et remontant à 1950[2]. Et il en retient d'abord la forte critique à l'encontre des tentatives de mathématisation traditionnellement géométrique en biologie des formes. Il la reprend certes à son compte, mais d'une manière très fortement décalée. C'est d'elle en effet qu'il tire l'idée de recourir aux principes de l'ingénierie alors que Waddington en tire, exactement à la même époque (1954), une leçon quasiment inverse : ce dernier prône le recours massif à des équations intégro-différentielles à la Lotka-Volterra dans une perspective d'identification formelle entre les questions de dynamique de population et les problèmes de compétition entre enzymes pour la consommation de matériaux, cela en vue de la construction

[1] Cet embryologiste est à l'époque connu pour avoir montré, dans les années 1930, que les substances inductrices d'organogenèse sur les territoires *a priori* susceptibles de développer des organes (zones des organismes appelés « organisateurs » à la suite des expériences de H. Spemann entre 1921 et 1924) pouvaient être de nature purement chimique et non essentiellement physiologique ([Le Douarin, N., 2000], p. 150). Mais hostile au réductionnisme génétique des généticiens et par la suite à l'hégémonie de la biologie moléculaire, à partir des années 1940, il tâche de réhabiliter l'idée d'une épigenèse organisée en la concevant à l'œuvre au cœur même des processus d'histogenèse (genèse de la cellule) et d'embryogenèse ([Waddington, C. H., 1962], pp. vii-viii). Il ne lui semble en effet pas possible d'attendre les progrès hypothétiques de la biochimie pour produire une théorie embryologique formalisée dans la mesure où, dans tout développement organique, se manifeste déjà clairement des stabilités globales, comme des passages globalement obligés, au delà de la complexité pour l'heure irréductible des processus biochimiques souterrains. Il en avait ainsi conçu la notion de « chréode » ou « créode », c'est-à-dire de « canalisation » ou de « sentier » de développement pour certains organes ou groupes d'organes. Voir [Waddington, C. H., 1962], p. vii et p. 44.

[2] [Cohn, D. L., 1954], p. 74.

organique (le développement) au niveau cellulaire[1]. Autrement dit, Waddington en revient à ce qui est le deuxième niveau formel chez Rashevsky : celui de la thermodynamique. Il prend d'ailleurs explicitement comme modèle cette discipline[2] alors même que Rashevsky veut, comme nous l'avons vu, fonder ce qui en est en effet l'équivalent en biologie, à savoir la dynamique des populations. Waddington veut faire du Lotka généralisé au niveau cellulaire alors que Rashevsky et Cohn veulent tout au contraire fonder ou retrouver l'approche globale de Lotka par des théorisations constructives intermédiaires.

L'identité des références mais aussi des critiques apportées aux approches antérieures doublée de la franche opposition entre les conséquences que les protagonistes en tirent nous aide ici à concevoir la ligne de fracture proprement contingente (c'est-à-dire non exclusivement déterminée par des arguments techniques ou scientifiques) qui existe alors au sujet de la mathématisation des formes entre la critique waddingtonienne des mathématisations antérieures et la critique rashevskyenne. Mais que dit exactement Waddington sur les mathématisations globale et de style géométrique à la d'Arcy Thompson qui puisse tout de même faire écho dans l'école de pensée de Rashevsky ?

« D'un point de vue strictement géométrique, toute nouvelle cavité isolée qui apparaît à l'intérieur d'un corps, telle qu'une île de sang dans un embryon, ou une vacuole de nourriture dans une amibe, augmente le degré de complexité de la forme d'une unité, tandis qu'une nouvelle excroissance externe, même si elle est aussi importante qu'un membre, laisse le degré de complexité inchangé. Il est évident que dans ce cas nous ne pouvons pas passer simplement de relations mathématiques à des propositions portant sur des relations biologiques. Nous avons besoin d'un analogue spécifiquement biologique de la topologie – une nouvelle branche de la science dans laquelle des relations de type logique utilisées dans la topologie normale seraient instaurées entre des entités dont la définition serait essentiellement biologique. »[3]

David Cohn en lisant cet extrait comprend bien que c'est l'approche géométrique traditionnelle qu'il faut bannir. Mais il en conclut que c'est la perspective mathématiste, abstraite et générale, que Waddington critique en tant que telle. C'est pourquoi il embraye immédiatement avec sa propre proposition : « nous devons tempérer nos mathématiques avec des considérations pratiques »[4]. Il ajoute même : « plutôt que des mathématiques abstraites, essayons une application des principes de l'ingénierie »[5]. Mais il n'est au fond pas d'accord avec la seconde partie de l'extrait, cette partie qui sera pourtant si importante pour d'autres écoles de pensée à venir, notamment en France[6], puisque c'est celle qui présente une proposition qui se veut inédite :

---

[1] [Waddington, C. H., 1962], p. 46.

[2] Voir [Waddington, C. H., 1962], pp. 45-46 : "What we should, I think, like to possess is a body of theory comparable to the major physical theories, such as thermodynamics, general relativity, wave mechanics. Population genetics and evolution are almost the only divisions of biology for which theories of this character are available."

[3] "From the strictly geometrical point of view, each new isolated cavity appearing within a body, such as a blood island in an embryo, or a food vacuole in an amoeba, raises the degree of complexity of the form by one unit, whereas a new external excrescence, even if it is as functionally important as a limb, leaves the degree of complexity unchanged. It is obvious in this case that we cannot pass simply from the mathematical relations to statements about biological relations. We should require for that a specifically biological analogue of topology – a new branch of science in which relations of the logical kind used in normal topology were set up between entities whose definition was essentially biological", [Cohn, D. L., 1954], p. 59.

[4] "Thus we must temper our mathematics with practical considerations", [Cohn, D. L., 1954], p. 60.

[5] "Rather than abstract mathematics let us attempt an application of engineering principles", [Cohn, D. L., 1954], p. 60.

[6] Voir les travaux spéculatifs de René Thom et leurs reprises philosophiques par Jean Petitot et Alain Boutot. Nous exposerons leur rôle dans l'histoire des modèles de morphogenèse de plantes au chapitre « Thermodynamique et topologie différentielle des formes ».

oublier la géométrie au sens strict, ne pas renoncer aux mathématiques abstraites, mais recourir à une géométrie des lieux, à une topologie acclimatée à la biologie, cela pour pouvoir rendre compte de l'émergence de nouvelles structures brisant les continuités métriques habituelles qu'impose encore une « théorie des transformations ».

Donc finalement, contre la géométrisation classique en biologie mathématique spéculative, Cohn se sert des arguments critiques de l'embryologie théorique et organiciste contemporaine mais pour mettre en fait en valeur la réhabilitation rashevskyenne de la notion de fonction dans son usage heuristique pour la mathématisation des formes.

Mais chez lui, cette notion de fonction est elle-même complètement banalisée et explicitement identifiée à la fonction que remplit un artefact humain conçu sur le papier en vue de la réalisation de tel ou tel acte. De plus, comme les « créodes » waddingtoniennes le suggèrent au niveau qualitatif et intuitif[1], la fonction abstraite optimisée (le programme de développement organique qui se déroule) peut se morceler en un ensemble de différentes fonctions relativement autonomes, à visées plus « concrètes » et néanmoins mutuellement combinables. C'est en cela précisément que le système biologique abordé du côté de la forme autorise une approche de type « conception de systèmes artificiels complexes » (résultant d'une combinaison de sous-systèmes optimisables séparément) à la manière d'un ingénieur.

L'optimisation du tout passe par l'optimisation des parties

Dans son travail précis, le but de David Cohn est d'arriver à construire la formule mathématique analytique de la résistance totale que le système artériel oppose au flux de sang sortant du cœur. Il est à noter qu'à aucun moment il ne parle de « modèle » ; mais il utilise en revanche fréquemment le terme de « système », issu du langage des ingénieurs, pour désigner aussi bien le réseau vasculaire naturel que celui qu'il va concevoir par morceaux et qu'il jugera « similaire » au réseau réel.

Cohn découpe alors son problème en autant d'étapes qu'il juge nécessaires d'introduire, en conformité avec le problème d'optimisation que, séparément, chacune d'entre elles suscite. Il part donc du postulat que « la croissance de l'individu n'est rien de plus que la somme des croissances de ses parties »[2]. Il estime en effet que, comme le système naturel est une combinaison de fonctions qui sont chacune optimisées de façon relativement indépendante, il est en droit de considérer que l'optimum du tout est la somme des optima des parties. Il suffit donc de considérer l'être vivant comme l'analogue d'un artefact pour lequel on a pris les plus belles pièces, les organes les mieux adaptés à leurs fonctions particulières.

Cohn calcule d'abord séparément le rayon optimal de l'aorte en reprenant les analyses de Cecil D. Murray mais, curieusement, sans le citer aucunement. Rappelons qu'il est intéressant pour une aorte d'avoir un rayon assez grand car le nombre de Reynolds du sang n'est pas suffisamment bas pour donner lieu à des turbulences et la circulation se fait alors sans forte résistance. Mais d'un autre côté, il est avantageux pour un mammifère (« il sera plus efficace »[3] écrit Cohn littéralement) d'abaisser ce rayon car cela lui demandera moins d'énergie de maintenance métabolique à destination du tissu vasculaire et les propriétés élastiques de l'aorte joueront en faveur d'un retour veineux rapide rendant l'animal plus réactif en cas de stress et donc

[1] En 1940, Waddington n'a proposé cette notion de « créode » ou « canal de développement » qu'à partir de raisons qu'il qualifiera lui-même de « purement intuitives », [Waddington, C. H., 1962], p. 46.
[2] [Cohn, D. L., 1954a], p. 62.
[3] "The animal will be more efficient …", [Cohn, D. L., 1954a], p. 61.

plus viable du point de vue de la sélection naturelle. De là Cohn tire une valeur optimale pour l'aorte. Ensuite il fait de même successivement pour les dimensions optimales des capillaires, pour la structure du système de branchaison, pour les diamètres relatifs des vaisseaux à un branchement et enfin pour la longueur relative des branches. En utilisant à chaque fois des raisonnements de bon sens sur ce qui doit définir quantitativement l'optimal de la fonction exercée à tel ou tel niveau organique, il parvient à exprimer la résistance totale au flux sanguin du système artériel en sommant les résistances locales à chaque ordre de branchaison.

Pour parvenir à une sommation mathématiquement exprimable des contributions locales et dépendant chacune de fonctions différentes, Cohn exprime en effet toutes ses contributions en termes de résistance hydrodynamique (au sens de la loi de Poiseuille). C'est là probablement la raison principale pour laquelle cette approche « constructiviste » par morceaux se recombine et fonctionne. La mathématisation semble accomplie et la « construction » du système similaire est concluante : on arrive à des formulations mathématiques de notions additionnables comme le sont les « résistances » en série[1]. Il apparaît alors possible de combiner mathématiquement les valeurs quantifiées jusque là séparément de façon à caractériser quantitativement le système global. Dans ce cadre-là, comme dans celui d'un réseau de résistances électriques en série, la résistance de la somme est bien la somme des résistances car « nous considérons le système comme une *série* de plusieurs vaisseaux parallèles »[2]. L'hypothèse lourde de l'additivité des contributions du point de vue fonctionnel ne repose donc finalement sur rien d'autre que sur une perspective uniquement hydrodynamique (ou électrodynamique) et sur l'usage généralisé de la loi de Poiseuille.

Quel résultat Cohn peut-il finalement en tirer ? Une valeur théorique pour le flux de sang total dont l'ordre de grandeur correspond en effet à celui de la valeur mesurée. Donc Cohn met pour la première fois en évidence, dans l'école de Rashevsky, le fait que l'approche par principes fonctionnels peut mener à des quantifications vérifiables empiriquement. Il semble que Rashevsky ait accueilli ce travail avec un grand intérêt dans la mesure où il a tenu à publier la même année un autre article de Cohn[3] qui, sur une suggestion de Rashevsky lui-même, modifie un peu l'arrangement de son système de branchaison. Cohn ne considérera plus un système de branchements imbriqués et dichotomiques, mais il considérera seulement l'ordre 1 de branchaison, Rashevsky ayant fait valoir l'idée que c'est essentiellement les vaisseaux de cet ordre-là qui jouent un rôle.

Toujours est-il que Cohn et Rashevsky n'en tirent que des allures, des valeurs moyennes ou limites, des ordres de grandeur. Ainsi, pour pouvoir calculer ses valeurs théoriques intermédiaires, Cohn a recours à des mesures très précises qui avaient été faites par un autre auteur sur un chien de 13 kg. Mais, pour pouvoir utiliser ces données dans ses fonctions mathématiques locales, il faut qu'il suppose la forme du chien réel comme étant équivalente à celle d'un cube (*sic*) : « ce chien peut être idéalisé en un cube de 23 cm de côté »[4]. À chaque étape de formalisation d'une fonction à optimiser, Cohn se livre en fait à des idéalisations très sévères, ce qui explique le paradoxe selon lequel, même en utilisant une science plus « concrète »[5] pour sa formalisation mathématique, il n'ait pas tout à fait réussi à rendre cette représentation mathématique réellement prédictive et opérationnelle.

---

[1] Même s'il n'insiste pas sur l'antériorité manifeste de Cohn, le thermicien Adrian Bejan reprend aujourd'hui (2000) cette hypothèse avec sa « théorie des constructales ». Il le cite tout de même, ainsi que Murray. Voir [Bejan, A., 2000], pp. 82, 93, 108 et 115.
[2] "We consider the system as a series of many parallel vessels", [Cohn, D. L., 1954a], p. 70. C'est nous qui soulignons.
[3] [Cohn, D. L., 1954b].
[4] "The dog can be idealized into a cube of side of 23 cm" (*sic*), [Cohn, D. L., 1954a], p. 71.
[5] Selon ses propres termes, [Cohn, D. L., 1954a], p. 60.

On remarque toutefois qu'une formalisation de la morphogenèse d'un arbre vasculaire entier a pu être atteinte par une sorte d'érosion invincible de l'approche purement théorique de Rashevsky. Comme si les résistances physicalistes à l'approche par modèles devaient tôt ou tard en rabattre, entre ces années 1930 et 1950.

Il est alors une autre stratégie de résistance théorique qui va se mettre en place à la faveur des déplacements de statut dont bénéficient la logique et les mathématiques, et par conséquent aussi leurs fonctions dans les sciences de la nature, en ce début du 20ème siècle. Cette stratégie va donner naissance à une tentative curieuse : une axiomatisation de la biologie et en particulier de la morphogenèse. Elle est l'initiative du biologiste Joseph Henry Woodger. Nous nous intéresserons à la nature et à l'esprit de son travail pour au moins deux raisons : 1- il constitue un cas d'interaction inédit entre l'histoire récente des mathématiques et de la logique et l'histoire de la biologie théorique de la forme ; 2- après trois décennies de discrédit et de quasi-oubli, il eut l'occasion de renaître, sous une forme certes amendée, précisément à l'époque où l'ordinateur devint disponible. L'analyse de ce travail permettra donc de mieux faire comprendre les blocages qui se présentaient à la biologie théorique de l'époque comme de faire voir, par contraste, ce que l'ordinateur permettra par la suite de débloquer dans la formalisation de la morphogenèse.

CHAPITRE 7 - L'axiomatisation de la biologie par Joseph Henry Woodger (1937)

Joseph Henry Woodger (1894-1981) a déjà fait l'objet d'un certain nombre de travaux de sociologie et d'histoire des sciences. Ces derniers montrent surtout la faillite des propositions de Woodger dans le domaine de la génétique et de ce qui allait devenir la biologie moléculaire[1]. Pour notre part, nous nous attacherons essentiellement à restituer de son approche ce qui touche à la formalisation mathématique de la morphogenèse, en insistant sur quelques points techniques de cette théorie formelle qui joueront un rôle important et qui ont été jusque là négligés par les commentateurs. Cet aspect de son œuvre a été en effet très peu étudié[2]. Nous aurons d'ailleurs l'occasion de nous demander si, dans ce cas, le diagnostic devra être aussi tranché. En fait, il nous sera donné de constater que Woodger n'a peut-être pas joué de rôle aussi négatif et restrictif en ce qui concerne l'histoire de la modélisation des plantes.

J. H. Woddger naît dans le Norfolk, en 1894. Depuis plusieurs générations, sa famille est partie prenante dans l'industrie de la pêche locale. Selon ses collègues W. F. Floyd et F. T. C. Harris[3], il doit à cette activité familiale son grand intérêt pour le vivant sous toutes ses formes, depuis ses études secondaires. C'est donc avec une certaine motivation qu'il commence des études de zoologie au *University College* de Londres en 1911. Mais son cursus est interrompu par la guerre. Du point de vue de sa formation, c'est un gros contretemps car, en cette fin d'année 1914, ses résultats sont déjà excellents et remarqués. Il décroche coup sur coup le prix de l'université en zoologie et une bourse de recherche (la *Derby Research Scholarship*)[4]. La guerre brisant ses projets, Woodger réagit en s'engageant comme volontaire dans le régiment du Norfolk en avril 1915. Mais il ne reste pas longtemps en Europe et est envoyé en Mésopotamie, récemment conquise et occupée, pour servir comme protozoologiste au laboratoire central d'Amara. C'est là qu'il rencontre le Docteur Ian Suttie, jeune psychiatre britannique alors à l'écoute des récentes théories freudiennes[5]. Il est son compagnon d'arme lors de la bataille de Shumran Bend[6] menée pour la conquête de Bagdad. Ce dernier est le premier à l'initier à la réflexion critique, épistémologique et méthodologique en sciences.

Après sa démobilisation en février 1919, Woodger peut enfin s'engager dans un travail de recherche. Ses travaux appartiennent alors au domaine de l'embryologie cellulaire et portent sur la formation de l'appareil de Golgi[7] dans diverses situations biologiques, notamment dans le cas de

---

[1] Voir [Ruse, M., 1975], [Roll-Hansen, N., 1984] et [Abir-Am, P., 1987].

[2] Cependant, Pnina Abir-Am rappelle le contenu de certaines interventions de Woodger sur l'embryologie *in* [Abir-Am, P., 1987], p. 14 *sqq*. Nils Roll-Hansen résume quelques unes de ses idées dans [Roll-Hansen, N., 1984], pp. 424-425.

[3] [Gregg, J. R. et Harris, F. T. C., 1964], p. 1.

[4] [Gregg, J. R. et Harris, F. T. C., 1964], p. 1.

[5] En 1935, dans son unique livre *The Origins of Love and Hate*, Suttie critiquera le cynisme et la vision patriarcale de Freud. Au tabou de l'inceste, il opposera l'existence dans la société d'un « tabou de la tendresse ». Le désir de tendresse, rendu tabou par une société machiste, tirerait son origine des liens d'amour et de tendresse caractérisant, selon Suttie, les rapports mère-enfant. C'est donc l'amour et son refoulement et non la pulsion sexuelle qui donnerait sa configuration à la vie individuelle et sociale. Voir [Rissik, A., 2000]. On peut imaginer que Woodger se retrouve dans cette vision « radicale » de la société (au sens du « radicalisme » anglais) au vu de ses propres options politiques progressistes et égalitaristes. Voir [Abir-Am, P., 1987], p. 10.

[6] [Gregg, J. R. et Harris, F. T. C., 1964], p. 2.

[7] Du nom du cytologiste italien Camillo Golgi (1843-1926). L'appareil de Golgi est un type d'organite présent dans les cellules des métazoaires et qui, notamment, entre en jeu dans la synthèse glucidique permettant la minéralisation cellulaire. Voir l'article de Louise Zylberberg *in Encyclopaedia Universalis*, 1989, Tome 15, p. 393a.

la genèse de l'œuf. Il publie quatre articles sur ce sujet de 1920 à 1925. Mais ses publications biologiques vont en rester là car, dès 1922, il se voit confier une charge d'enseignement très lourde à la *Middlesex Hospital Medical School*. Et ses recherches biologiques de terrain en embryologie descriptive vont en pâtir au point de s'interrompre au profit de réflexions méthodologiques plus générales sur la biologie, son enseignement et la construction des théories. En 1926, Woodger a néanmoins l'opportunité de rejoindre le zoologiste et embryologiste autrichien Hans Leo Przibram[1] (1874-1944) à l'Université de Vienne afin d'y poursuivre sur un semestre des recherches sur la transplantation dans les annélides (vers annelés aquatiques ou terrestres[2]). Entre-temps, il a appris, par lui-même, à lire et à parler couramment l'allemand[3]. Ce qui l'incite donc à faire ce voyage. Mais là encore, Woodger est victime d'une certaine malchance : les espèces d'annélides retenues ne permettent pas l'opération de transplantation qu'il escomptait et le sol gelé (puisqu'on est en hiver lorsqu'il arrive à Vienne) lui interdit de récolter d'autres types de vers dans l'immédiat. Incapable, dans ces conditions, de se livrer au travail expérimental prévu, il en profite pour participer aux discussions méthodologiques qui animent alors vivement le département de recherche de Przibram à l'Université de Vienne. Même si ses collègues Floyd et Harris ne le précisent pas dans leur biographie, on peut supposer que Woodger se tient alors informé des discussions du « Verein Ernst Mach »[4] d'abord informelles jusqu'en 1928, date de sa fondation officielle, et que Moritz Schlick, alors professeur de Philosophie à l'Université de Vienne, avait créé dès 1922[5]. Toujours est-il que Woodger, à son retour en Angleterre, focalise son attention sur les hypothèses implicites qui émaillent le discours scientifique et, en particulier, biologique.

Le contexte philosophique

En 1929, alors qu'il est assistant en biologie à l'Université de Londres[6], Woodger se fait donc connaître du public anglophone par un premier ouvrage critique sur l'état jugé par lui déplorable de la biologie au regard de ce que l'on devrait attendre d'une science rationnellement et objectivement constituée : *Biological Principles*. Fortement impressionné par les réflexions qu'il avait entendues à Vienne mais aussi par sa lecture des premiers textes du mathématicien, logicien et philosophe Alfred North Whitehead (1861-1947) sur l'algèbre et sur la géométrie projective, comme par les *Principia Mathematica* que Whitehead avait fait paraître avec Russell à Cambridge entre 1910 et 1913, Woodger propose aux sciences du vivant une méthodologie rigoureuse permettant de lever l'ambiguïté et l'insignifiance de certains des termes qu'elle emploie. Ce livre lui

[1] Hans Leo Przibram avait travaillé sur la régénération chez les crustacées, sur la morphologie des animaux et sur des questions plus générales de biologie quantitative. Il avait une approche physiologiste et mécaniste de la formation des organismes. En 1906, il avait été un des fondateurs de l'institut de recherche biologique de Vienne. Cet institut, appelé le « Vivarium », se situait dans le Parc du Prater de Vienne jusqu'à sa destruction en 1945. Démis de ses fonctions dès 1938 et fuyant, avec sa femme, les politiques de déportation des juifs mises en œuvre en Autriche depuis l'Anschluss, il émigrera à Amsterdam en 1939. Cette émigration ne leur sauvera pas la vie car ils seront déportés par l'occupation allemande en 1943. Ils mourront au printemps 1944 dans le camp de concentration de Theresienstadt.

[2] Voir l'article sur les « Annélides » de Robert Manaranche *in Encylopaedia Universalis*, Tome 2, p. 460c. Ces vers, pourvus d'une segmentation corporelle caractéristique, présentent des stades embryologiques intermédiaires entre ceux des vertébrés et des invertébrés, d'où l'intérêt qu'on leur a porté assez tôt pour la compréhension des processus embryologiques. En 1935, Marcel Prenant écrira un livre qui leur sera entièrement consacré : *Annélides. Leçons de zoologie*, Hermann, Paris.

[3] [Gregg, J. R et Harris, F. T. C., 1964], p. 3.

[4] Qui allait devenir le germe de ce qu'on appellera le « Wiener Kreis » ou « Cercle de Vienne ».

[5] Voir, pour cette précision, la préface de Max Black *in* [Carnap, R., 1932, 1934, 1995], p. 9.

[6] Il enseigne alors la physiologie générale et la morphologie à des étudiants en médecine.

vaut le titre de *D. Sc*, *Doctor of Science* de l'Université de Londres[1]. Woodger, tout en continuant son enseignement relativement élémentaire de physiologie et d'embryologie à destination des étudiants en médecine, poursuit ses investigations de philosophe des sciences, notamment en prenant contact avec Karl Popper qui fait paraître son *Logik der Forschung* à Vienne en 1934. Popper le met en rapport alors avec le logicien polonais Alfred Tarski (1901-1983). Et Woodger, dès 1935, se rend en Pologne où il rencontrera Jan Lukasiewicz (1878-1956) et Tarski. C'est donc bien sur cette lancée logiciste qu'en 1937, il publie son ouvrage clé : *The axiomatic method in biology*.

Entre-temps, en 1932, Woodger avait été un des co-fondateurs du Groupe de Biologie Théorique (*Theoretical Biology Club*) qui s'était constitué à Londres autour des idées de d'Arcy Thompson et de Whitehead sur la continuité entre sciences biologiques et sciences physiques. Il rencontrait là régulièrement les embryologistes Joseph N. Needham et Conrad H. Waddington, le physico-chimiste John D. Bernal ainsi que la mathématicienne Dorothy Wrinch[2]. C'est dans ce cadre que s'était progressivement affirmé son anti-mécanisme ou anti-réductionnisme et ce qu'il appelait son « vitalisme méthodologique »[3]. Son idée centrale en ce qui concerne les théories de la biologie était la suivante : de même que la physique quantique avait enseigné à la physique à ne plus être platement réaliste en ce qui concerne les entités ultimes de la matière, de même, la biologie théorique, sans tomber dans un pur phénoménisme ou fictionnalisme, devait s'appuyer sur différents « royaumes » de réalités en travaillant à des théories explicatives et axiomatisées qui nous montrent comment l'on passe de l'un à l'autre mais sans espérer trouver jamais un royaume de réalités fondamentales.

Dès le début du livre de 1937, de façon assez significative quoique sans doute un peu par provocation, il compare la situation de la biologie au marasme économique qui a succédé à la grande crise de 1929 et que l'Angleterre subit encore. Selon lui, comme il est des gens pour dire qu'il faudrait remplacer le « libre jeu des forces naturelles » en économie par un « système économique artificiel et planifié », il y aurait tout lieu de penser que l'instauration d'un langage artificiel « scientifiquement parfait »[4] en biologie donnerait les mêmes résultats heureux[5]. Car le langage biologique a trop pour habitude de servir des fins extra-scientifiques, émotionnelles par exemple. Un langage artificiel, formellement purifié, et que l'on pourrait soumettre au calcul neutraliserait ces velléités subjectives dommageables. C'est donc la raison principale qu'il invoque de façon liminaire pour justifier explicitement son ralliement au projet des logiciens et philosophes logicistes de l'époque, en particulier Whitehead et Carnap.

Or, rappelons d'abord que le projet commun de Whitehead et Russell (1872-1970) était initialement de montrer le fondement essentiellement logique des constructions mathématiques au moyen de la méthode axiomatique. Pour eux, il s'agissait surtout de contrer les arguments des

---

[1] [Gregg, J. R et Harris, F. T. C., 1964], p. 4.

[2] Ce groupe se réunissait régulièrement le week-end à Oxford ou Cambridge ou bien encore dans un cottage du Norfolk. D'après [Gregg, J. R et Harris, F. T. C., 1964] (p. 5), s'y retrouvaient fréquemment J. H. Woodger, Joseph et Dorothy Needham, J. D. Bernal, Conrad. H. Waddington, P. B. Medawar, W. F. Floyd, Dorothy Wrinch et L. L. Whyte.

[3] [Roll-Hansen, N., 1984], p. 420.

[4] "Just as many people believe that our present economic difficulties could be avoided by the substitution of a planned artificial economic system for our present natural one, guided only by the 'free play of natural forces', so there is a reason to hope for corresponding improvements from the substitution of a planned artificial language for our present natural one, which serves emotional as well as scientific ends and possesses a syntax which renders it unfitted for purposes of calculation", [Woodger, J. H., 1937], p. viii.

[5] Ce qui est donc une manière à peine allusive d'assimiler directement le travail d'axiomatisation de la biologie à une politique de planification socialiste de l'économie. Par cette analogie, Woodger se présente lui-même comme assez favorable à cette solution politique de mise à plat et de planification de l'économie. Cette consonance (inattendue) entre le politique et l'épistémologique joue donc pour lui un rôle apparemment essentiel pour la légitimation de son projet épistémologique et scientifique. Pour lui, le politique pourrait servir de modèle à l'épistémologique.

intuitionnistes qui commençaient à multiplier leurs attaques comme autant de réactions de rejet face au déploiement des techniques mathématiques formalistes. Dans les *Principia Mathematica*, grâce à une notation très formelle et épurée, et en remplaçant la forme logique sujet-prédicat par le calcul des prédicats au moyen de quantificateurs et d'opérateurs logiques (ou foncteurs)[1], ils montraient comment construire les axiomes de la théorie des ensembles, et, par extension croyaient-ils, la totalité des langues scientifiques bien formées[2]. Ainsi en généralisant le recours à des fonctions propositionnelles[3] et en restreignant l'emploi des arguments de ces fonctions à un certain type d'entre eux[4], ils parvenaient d'une part à rendre logiquement manipulables les symboles de nombres infinis alors même que les intuitionnistes (dont le mathématicien L. J. Brouwer[5]) en contestaient la possibilité, et d'autre part, à purifier la théorie des ensembles des paradoxes engendrés par l'autoréférence[6], comme ils se manifestent par exemple dans la situation où la phrase « tous les Crétois sont menteurs » est prononcée par Épiménide le Crétois[7]. Ce faisant, Whitehead et Russell avaient manifesté l'idée que pour construire un savoir rigoureux, on devait peu ou prou parvenir à axiomatiser ce savoir[8]. Dès avant sa lecture des *Principia*, Woodger avait partagé ce point de vue déjà ancien chez Whitehead. Mais une autre option philosophique sous-jacente transparaissait dans le travail commun de 1910 : ce que l'historien de la philosophie

---

[1] Méthode auparavant introduite par la mathématicien et logicien allemand Gottlob Frege (1848-1925). Voir [Jacob, P., 1980], p. 19.

[2] Au sujet des sciences formelles comme les mathématiques, Whitehead et Russell écrivent : "The adaptation of the rules of the symbolism to the processes of deduction aids the intuition in regions too abstract for the imagination readily to present to the mind the true relation between the ideas employed […] And thus the mind is finally led to construct trains of reasoning in regions of thought in which the imagination would be entirely unable to sustain itself without symbolic help.", [Whitehead, A. N. et Russell, B., 1910, 1962, 1970], Introduction, p. 2. Autrement dit, la symbolique permet d'abord et avant tout de pallier la faiblesse de notre représentation imagée quand les idées sont trop abstraites, comme il arrive en mathématique. C'est bien l'objet principal des *Principia*. Mais dans la suite du texte, les auteurs suggèrent une extension de l'usage de la symbolique aux « régions de pensée dont on suppose qu'elles ne peuvent être amenées au traitement mathématique » : "In proportion as the imagination works easily in any region of thought, symbolism (except for the express purposes of analysis) becomes only necessary as a convenient shorthand writing to register results obtained without its help. It is a subsidiary object of this work to show that, with the aid of symbolism, deductive reasoning can be extended to regions of thought not usually supposed amenable to mathematical treatment. And until the ideas of such branches of knowledge have become more familiar, the detailed type of reasoning, which is also required for the analysis of the steps, is appropriate to the investigation of the general truths concerning these subjects", [Whitehead, A. N. et Russell, B., 1910, 1962, 1970], Introduction, p. 3. Autrement dit, dans les sciences non fondées sur une analysabilité logique ultime des objets d'étude, le symbolisme peut également servir. Mais il n'a pas alors de rôle analytique mais seulement un rôle d'écriture abrégée et d'enregistrement (*register*) des résultats. Ces résultats sont eux-mêmes en attente d'être analysés par des moyens autres, appropriés à la région que vise cette science. La symbolique peut donc servir aussi à synthétiser et combiner des idées d'objets eux-mêmes non encore complètement élucidés. Mais, dans ce dernier cas, la combinaison de symboles n'imite encore qu'un *raisonnement (reasoning)*, alors que dans son règlement du problème du fondement des mathématiques, elle imite une *essence logique* totalement élucidée (ou supposée telle par les auteurs). Alors que l'usage synthétique de la symbolique est plutôt cognitif, son usage analytique est réalistique puisqu'il vise des réalités logiques ultimes. Selon nous, il y a dans cette distinction majeure une des sources de l'acceptabilité nouvelle des « modèles » formels dans les sciences non formelles au tournant du siècle.

[3] Une fonction propositionnelle, au sens de Russell, est une fonction de prédication qui sous la forme d'une fonction logique à valeur de vérité remplace le schéma classique sujet-prédicat pour toute proposition. Sur la genèse de cette notion chez Russell, voir [Jacob, P., 1980], chapitre I, notamment pp. 49 et 71.

[4] En fait, il s'agit de « types » de classes d'arguments ou de variables. Voir dans les *Principia* [Whitehead, A. N. et Russell, B., 1910, 1962, 1970], Introduction, chapter II, §§ IV-V, pp. 47-55.

[5] Cité dans [Whitehead, A. N. et Russell, B., 1910, 1962, 1970], Introduction to the Second Edition, p. xlvi.

[6] "An analysis of the paradoxes to be avoided shows that they all result from a certain kind of vicious circle", [Whitehead, A. N. et Russell, B., 1910, 1962, 1970], Introduction, chapter II, §I, p. 37. Le plus connu de ces paradoxes est celui qui porte sur la définition de l'« ensemble de tous les ensembles qui ne se contiennent pas eux-mêmes » : s'il se contient lui-même, il ne se contient pas lui-même, s'il ne se contient pas lui-même, il se contient lui-même.

[7] [Whitehead, A. N. et Russell, B., 1910, 1962, 1970], Introduction, chapter II, §III, p. 46.

[8] De son côté, Whitehead était parvenu à cette idée par ses travaux préalables sur une algèbre universelle et sur la géométrie projective (1898 et 1906). Dans cette dernière, avec la mise en évidence du principe de dualité, il apparaissait nettement et depuis une quarantaine d'année que ce qui devait finalement demeurer d'essentiel dans les axiomes était les *relations* formelles entre les termes préalablement définis. Voir [Weyl, H., 1949, 1963], p. 26.

analytique Peter Hilton a appelé l'« atomisme platonicien »[1] du premier Russell. Selon cette perspective à la fois philosophique et épistémologique, et conçue au départ comme une arme de combat tournée contre les néo-hégéliens anglais, le monde est composé de concepts atomiques mais aussi de relations entre ces concepts atomiques, tout aussi réelles et irréductibles qu'eux[2].

Or, c'est bien cette sorte de *réalisme de la relation logique* qui fait une forte impression sur le biologiste et morphologiste qu'est alors Woodger. C'est là qu'il aperçoit la possibilité de transférer à la biologie le mode de présentation logiciste, jusque là essentiellement appliqué aux théories mathématiques (algèbre et arithmétique). Dans son livre de 1929, il exprime cependant son pessimisme à l'égard de l'éventualité de voir bientôt ses collègues mettre en œuvre un tel dispositif formel en biologie. Il fustige donc la formation des biologistes trop axée sur la pratique expérimentale et insuffisamment tournée vers la réflexion et la purification des termes servant à la théorie[3]. Ainsi, selon lui, le recours fantaisiste et hâtif à une terminologie finaliste ou téléologique, comme à une terminologie platement mécaniste[4], par exemple, trahit la volonté des biologistes de réduire leur domaine d'étude à autre chose que lui, mais sans avoir auparavant tenu sérieusement compte des *relations* tout à la fois formelles et réelles que leur objet manifeste pourtant dans toutes ces formes que l'on dit organisées ou organiques. Le relationnisme lui apparaît une bonne façon de s'extraire par le haut de l'opposition séculaire entre mécanisme et finalisme. C'est donc ce projet d'une axiomatisation de la biologie, comprise comme étant au service d'une valorisation de la nature jugée essentiellement *relationnelle* du substrat biologique, qu'il décide d'ébaucher lui-même dans son livre très spéculatif de 1937.

À ce sujet, on ne peut certes sous-estimer par ailleurs l'influence que les idées de Waddington sur le rapport de complémentarité entre génétique et embryologie doivent avoir sur lui[5]. Mais il est également certain, à le lire, que ce n'est pas seulement le Whitehead des *Principia* qui peut l'inciter à tenter audacieusement de transférer en biologie la méthode axiomatique et logiciste des sciences formelles. Car il ne faut pas oublier que Whitehead, de son côté, se détache rapidement de l'atomisme platonicien du premier Russell[6]. C'est ce dont témoigne les thèses inspirées et délibérément intuitives de *Process and Reality* (1929). Sa philosophie de l'organisme, en germe dans ses premiers ouvrages scientifiques (que Woodger a lus et cite[7]), enseigne à percevoir le monde à la manière d'un ensemble de processus morphogénétiques où le devenir des

---

[1] Dans son PhD intitulé "Origins of Analytical Philosophy", soutenu à Harvard en 1978, non publié, et cité par [Jacob, P., 1980], p. 37.

[2] [Jacob, P., 1980], p. 41 et p. 71.

[3] [Woodger, J. H., 1937], p. viii.

[4] Il renvoie donc mécanistes et finalistes dos à dos dans une perspective proche de l'organicisme.

[5] L'historien des sciences Scott F. Gilbert rappelle ainsi qu'en 1940, dans « *Organisers and Genes* », l'embryologiste Waddington tâchera, dans un esprit proche là encore de la vision philosophique unificatrice de Alfred North Whitehead, d'identifier l'« organisateur » de l'embryologiste avec le « gène » du généticien : les deux découvrant deux aspects partiels mais complémentaires d'un même phénomène de développement organique. Ainsi le noyau cellulaire (domaine de prédilection des généticiens) et le cytoplasme (domaine de prédilection des embryologistes) sont conçus comme des « partenaires en interaction », [Gilbert, S. F., 1988], p. 338. Cela permet à Waddington d'affirmer que ces deux approches partielles devaient être elles-mêmes couronnées ou complétées par une « théorie cohérente du développement » (selon les termes mêmes de Waddington, *ibid.*) encore à construire. Le caractère relationnel de l'organisation du développement apparaît ainsi essentiel à ses yeux. Assez naturellement, Woodger adopte cet aspect des idées de son collègue car il vient confirmer sa propre vision, même si lui-même ne peut s'autoriser d'une pratique expérimentale soutenue parce qu'il n'est pas un praticien éminent de l'embryologie, au contraire de Waddington.

[6] Voir [Saint-Sernin, B., 2000], p. 33. Pour ce passage, nous nous aidons des analyses éclairantes de Bertrand Saint-Sernin parues dans cet ouvrage.

[7] Même s'il ne le cite pas en revanche (peut-être parce que c'est explicitement un ouvrage de philosophie), Woodger a probablement lu *Process and Reality*, paru huit ans avant son livre. Cela est d'autant plus probable que, même si Whitehead était alors aux Etats-Unis où il enseignait à Harvard, *Process and Reality* était paru conjointement aux Etats-Unis et en Angleterre en 1929. On sait, par ailleurs, que sa philosophie est couramment débattue dans le cadre du Groupe de Biologie Théorique. Voir [Roll-Hansen, N., 1984], p. 417.

atomes de réalité éphémères le dispute au périr et à l'immortalisation par « *concrescence* ». Le terme de « *concrescence* » (croissance solidaire) rend compte du fait que les nécessaires devenir et périr de chaque atome de réalité engagent en même temps sa conservation, mais sous une autre forme, de par l'instauration processuelle d'une solidarité cosmique. Ce qui permet l'immortalisation (relative) de cet atome, ou de tout instant fugace de notre vie dans son périr même, provient du fait que l'évanouissement de cette individualité ne peut se faire qu'au profit d'une participation évanouissante aux autres unités en devenir (« *ingression* »). Il est donc essentiel de comprendre que, si la méthode logiciste, au langage atomisé et atomisant, peut s'appliquer en effet dans toutes les sciences de la nature pour Whitehead, ce n'est *pas* parce que la nature est *constituée* d'atomes ultimes[1]. En ce sens, chaque symbole du langage logiciste n'a pas à référer individuellement à un « concept » réaliste au sens du premier Russell[2]. Whitehead n'est pas un réaliste atomiste en ce sens. Puisqu'il conçoit l'univers dans une perspective de « morphologie cosmologique »[3], il est en effet nécessaire que les symboles atomiques qui, dans les sciences formalisées et axiomatisées, nous servent à imiter le jeu processuel des régions de l'univers soient individuellement *dépourvus de signification*[4]. Pour Whitehead, l'intérêt essentiel de la logistique, ce n'est *pas son réalisme*, c'est au contraire sa possibilité de ménager une zone d'ombre dans le symbole. De façon salutaire, l'axiomatisation logiciste empêche le scientifique de prétendre tout indiquer de la créativité insondable de chaque processus individuel. La méthode logiciste en ne donnant *pas de sens* à ses symboles pris séparément mais seulement à leurs *relations* mutuelles dans des fonctions propositionnelles préserve donc mieux la nature processuelle et durablement insondable des « atomes » éphémères de réalité. Or, c'est cet ensemble de relations logiques que Whitehead appelle la « morphologie »[5]. Selon nous, ce déplacement dans l'interprétation et la valeur de la méthode de l'atomisme logique comme cette redéfinition de la morphologie sont, plus qu'autre chose encore, ce qui permet à Woodger de penser à utiliser prioritairement la méthode des *Principia* en biologie et en embryologie.

La morphologie : atomisée et logicisée

Il nous faut en effet indiquer un autre déplacement crucial dont Woodger se fait explicitement l'écho dans l'introduction de son ouvrage de 1937. Dans ses premiers livres, Whitehead a beaucoup insisté sur le fait que les mathématiques n'étaient plus seulement la science des quantités et des métriques mais qu'elles devenaient plus généralement une science des formes. Or cette idée ne lui vient pas de nulle part. C'est bien sûr au spectacle de la crise des

---

[1] « La philosophie de l'organisme [de Whitehead] refuse de substantifier l'ultime : ce qui est ultime, c'est le 'procès' », [Saint-Sernin, B., 2000], p. 36.
[2] [Jacob, P., 1980], pp. 41 et 43.
[3] [Saint-Sernin, B., 2000], p. 51. « Or, que ce soit en physique, en biologie ou ailleurs, la morphologie, au sens de l'analyse des relations logiques, constitue le premier stade du savoir. C'est là la base de la nouvelle méthode 'mathématique' que Descartes a introduite. La morphologie traite des propositions analytiques, comme les appelle Kant. Par exemple, Locke écrit : 'Le nom commun des substances, tout comme les autres termes généraux, représentent les espèces : *ce qui n'est rien d'autre que* le fait de transformer en signes les idées complexes dans lesquelles plusieurs substances particulières s'accordent ou pourraient s'accorder, en vertu de quoi elles sont capables d'être comprises dans une conception commune, et d'être signifiées par un seul nom », [Whitehead, A. N., 1929, 1995], p. 241. C'est Whitehead qui souligne. Autrement dit, pour Whitehead, la morphologie n'est pas autre chose qu'une science des formes *logiques*, c'est-à-dire originairement, une science des formes affectant les *langages*, d'abord naturels puis artificiels, avec la symbolique. La science des formes est réduite chez lui à la science du langage entendu comme combinaison des signes, les signes ayant eux-mêmes pour vocation de représenter simplement des idées complexes. Avec lui, toute morphologie devient donc la morphologie d'un discours et des relations qui s'y énoncent.
[4] [Saint-Sernin, B., 2000], p. 33.
[5] [Whitehead, A. N., 1929, 1995], p. 241.

fondements des mathématiques du tournant du 20ème siècle que Whitehead peut se faire cette réflexion[1]. La tendance de la recherche mathématique, on le sait, est alors à la logicisation et à l'axiomatisation tous azimuts en vue d'apurer le fondement des mathématiques et de minorer la place de l'intuition dans leur construction, notamment depuis la crise qu'a constituée l'émergence des géométries non-euclidiennes[2]. Ainsi, ce qui peut alors apparaître de plus en plus évident aux yeux du mathématicien Whitehead doté, comme son collègue d'Arcy Thompson[3], d'une immense culture en science, en histoire des sciences et en philosophie, c'est le fait que, grâce à la mathématisation de la logique, il est enfin possible de marier Pythagore et Aristote, la pensée des quantités et la pensée des formes. Si la logique (l'atomisme logique) est la science morphologique (postulat de Whitehead), et si l'on peut mathématiser la logique (constat de Whitehead et Russell), alors on peut mathématiser la science morphologique. Mais cela, la pensée métrique, géométrique et mécaniste de d'Arcy Thompson l'ignore complètement. Au contraire du logicien et mathématicien Whitehead, d'Arcy Thompson a ignoré cette évolution des mathématiques contemporaines vers la logique des formes. C'est là une de ses limites. Comme nous l'avons vu précédemment, il en reste à une mathématique de la quantité et des métriques. Rashevsky, sur ce point, suivra d'Arcy Thompson encore longtemps, au moins jusqu'en 1954. Mais nous reviendrons sur l'infléchissement que finira tout de même par subir l'épistémologie biologique de Rashevsky à cette date.

Finalement, c'est donc pour l'ensemble de ces raisons qu'en 1937, Woodger sent en la pensée de Whitehead, à la différence de celle de d'Arcy Thompson, une nouvelle issue réellement prometteuse pour la formalisation de la biologie. La série des déplacements que permet d'une part l'évolution des conceptions de la logique et des mathématiques, d'autre part la « cosmologie morphologique » de Whitehead ouvre donc à Woodger une porte qu'il s'empresse de franchir dès lors qu'il souhaite également faire intervenir la philosophie du langage dans la biologie afin de l'assainir.

Carnap, Woodger et Rashevsky (1936-1938) : convergence et bifurcation

De Carnap, Woodger a lu de très près la *Logische Syntax der Sprache* paru en 1934. Il est intéressant pour nous de voir ce qu'il retient du physicalisme tel qu'il y est une fois de plus énoncé dans le cadre du problème de la réduction de la biologie à la physique[4]. On se rappelle en effet que Rashevsky, à la même époque, a dû être informé de ces thèses contemporaines du Cercle de Vienne. Dans son travail et dans son épistémologie, sans citer les auteurs du Cercle, Rashevsky fait ainsi directement écho à cet espoir de réduire à terme les lois biologiques aux lois physiques. De surcroît, et en conséquence, il se retrouve tout autant d'accord avec Neurath et Carnap dans leur projet commun de construire une science unifiée. Mais, de façon très significative, il n'en retient pas pour sa part le troisième point, essentiel pour les positivistes logiques, de la proposition

[1] Whitehead et Russell insistent sur ce point dans la préface des *Principia* : [Whitehead, A. N. et Russell, B., 1910, 1962, 1970], Preface, p. v.

[2] Woodger cite le mathématicien allemand Hermann Weyl (1888-1955), dans sa bibliographie, notamment son article de 1926 sur la méthode axiomatique. Voir la traduction anglaise [Weyl, H., 1949, 1963], pp. 18-29. Weyl y insiste sur la notion d'isomorphisme et précise qu'un système axiomatique est un moule logique (un réceptacle de formes vides : *Leerformen* dans l'article original) pour des « sciences possibles » (« *possible sciences* »), *ibid.*, p. 25. Il y définit un « modèle » comme une interprétation concrète d'un tel moule logique. Cette interprétation se produit lorsque les symboles du système axiomatique réfèrent tous à un « concept de base » (« *basic concept* ») de la science concrète et que les propositions valides dans le système correspondent à des propositions vraies dans le concret, *ibid.*

[3] Whitehead et d'Arcy Thompson se connaissaient personnellement et se côtoyaient régulièrement. On sait qu'ils étaient tous les deux membres de la « Société des Apôtres » à Cambridge. Voir [Saint-Sernin, B., 2000], p. 8.

[4] [Carnap, R., 1934, 1937, 2002], §83, pp. 323-324.

carnapienne : l'omniprésence du logicisme. Il ne veut comprendre ce réductionnisme qu'en un sens matériel relativement immédiat mais pas en un sens positiviste radical ou phénoméniste, comme celui qu'avait précédemment introduit Ernst Mach (1838-1916), et pour qui ce sont finalement les capacités qu'ont les entités physiques d'être des objets de sensation, d'observation et d'expérimentation qui font leur seule réalité[1]. Rashevsky reste au fond un réaliste de la matière, un mécaniste en ce sens, mais pas un réaliste de la sensation et de ce que le positivisme logique appelle, sous l'influence du phénoménisme, des observables. En quelque sorte, Rashevsky a raté le tournant linguistique du positivisme et de l'atomisme logique des années 1930, alors que Woodger, nous l'avons vu, joue à plein cette nouvelle carte pour la biologie, peut-être de manière prématurée d'ailleurs. En quoi va donc consister la proposition alternative de Woodger pour la biologie et notamment pour la biologie du développement et des formes ?

La méthode axiomatique en biologie

Dans son ouvrage de 1937, Woodger reprend telles quelles les notations que Whitehead et Russell avaient employées dans les *Principia*. Il ne prétend pas fonder de pied en cap une biologie formelle, il présente plutôt son travail comme une expérience d'application des méthodes des sciences exactes à la biologie[2]. Il cherche à se donner ce qu'il appelle un « calcul biologique »[3]. En 1937, comme nous l'avons vu, Woodger n'est plus lui-même un expérimentateur, pas même un véritable théoricien de la biologie en exercice. Il est avant tout un enseignant. Lorsque l'on consulte sa bibliographie[4], on est en effet surpris de voir que ses publications proprement biologiques, qui ne dépassent pas une dizaine si l'on compte les articles généraux sur la notion d'organisme, sont en nombre très limité et s'interrompent pratiquement à partir de 1925[5]. Woodger n'exerce donc pas très longtemps la biologie comme chercheur. Dès la fin des années 1920, il se pose préférentiellement des questions de type méthodologique. Le travail plus tardif que nous allons évoquer est donc de nature essentiellement *spéculative* car il ne repose que sur les connaissances acquises par d'autres et non sur une pratique expérimentale de terrain ni même sur des vérifications de loin en loin, à la manière de Rashevsky. Les seules validations que proposera Woodger consisteront donc à montrer que l'on retrouve des connaissances empiriques déjà acquises par ailleurs d'un point de vue uniquement qualitatif. Ce qui ne sera pas la moindre de ses limites, comme on peut déjà s'en douter.

Woodger ne cache pas son souhait de voir naître, à terme, une « théorie biologique systématique »[6]. Sur ce point, il est à remarquer qu'alors que Whitehead, Russell et Carnap

---

[1] Voir [Mach, E., 1911, 1922, 2000], p. 291 : « Il ne s'agit pas de supprimer le concept vulgaire de matière dans son usage domestique et usuel, et tel qu'il a été forgé indistinctement à cette fin. De même tous les concepts physiques de mesure demeurent à bon droit ; nous les soumettons seulement à une décantation critique, comme j'ai essayé de le faire dans le domaine de la mécanique, pour la chaleur, l'électricité, etc. Des *concepts empiriques* prennent simplement la place des *concepts métaphysiques*.[…] Les propositions des sciences n'expriment jamais que de telles *liaisons constantes* : 'D'un têtard se forme une grenouille. Le chlorure de sodium se présente sous forme cubique. La lumière se propage en ligne droite. Les corps tombent selon une accélération de 9,81 m/s^2.' Nous appelons *loi* l'expression conceptuelle de cette constance. » C'est l'auteur qui souligne. Voir également l'étude de [Verley, X., 1998], p. 30 : « L'exposition mécaniste ignore la sensation et s'oppose donc à la description physique, ouverte à toutes les manifestations sensibles de la nature. Elle réduit le sensible à un schéma abstrait. » D'où l'on voit que le mécanicisme de Rashevsky ne pouvait tout de suite aller de pair avec le positivisme logique.

[2] [Woodger, J. H., 1937], p. vii et p. ix.

[3] "biological calculus", [Woodger, J. H., 1937], p. vii.

[4] Voir [Gregg, J. R. et Harris F. T. C., 1964], pp. 473-476.

[5] En 1930, Woodger publiera cependant encore un article d'embryologie sur le crâne du lapin. Voir [Gregg, J. R. et Harris F. T. C., 1964], p.474.

[6] "systematic biological theory", [Woodger, J. H., 1937], p. ix.

n'employaient pas le terme de « théorie » pour désigner l'application de la méthode logistique aux sciences non formelles mais plutôt celui de système axiomatique, Woodger se distingue en l'utilisant dans ce contexte. En cela, il fait écho à la volonté partagée par nombre de ses contemporains (dont Lotka et Rashevsky) de construire une biologie théorique. Par ailleurs, il faut savoir que, comme Woodger connaissait et fréquentait personnellement Rudolf Carnap et Alfred Tarski, il s'est directement fait aider par eux dans son travail de formalisation de la biologie[1]. Tarski ajoute même un appendice de sa main à cet ouvrage pour expliciter des preuves formelles et développer certains concepts de Woodger grâce à l'axiomatique de la méréologie qu'il emprunte à son maître de l'Ecole de Logique de Varsovie, le mathématicien polonais Stanislaw Lesniewski (1886-1939)[2].

Comme Whitehead, Woodger considère que la biologie est une sorte de morphologie où la considération de la « forme du fait biologique » est essentielle[3]. Or, cette forme peut être incarnée (*embodied*) dans le système formel[4]. C'est cela qui donnerait une grande force et une grande clarté au savoir biologique. Il faut donc disposer de systèmes axiomatiques qui puissent convenir à l'embryologie, à la génétique, à la taxonomie. Or, Woodger précise que si l'on veut axiomatiser une science qui ne l'est pas encore, il n'y a que deux façons de procéder : soit on cherche un système axiomatique non interprété mais déjà existant et qui se trouve avoir une forme adéquate, soit on tâche de concevoir et de fabriquer un tel système uniquement à cette fin[5]. C'est cette deuxième solution qu'il choisit parce qu'il se présente comme un (modeste) précurseur en ce domaine et parce qu'il lui semble nécessaire d'adapter très précisément les axiomes et les relations aux problèmes biologiques. Woodger définit alors ce qu'il appelle le système « (**P**, **T**, **org**, **U**, **etc.**) »[6].

Le système axiomatique biologique « (P, T, org, U, etc.) »

Dans *The axiomatic Method in Biology* (1937), John H. Woodger définit le système axiomatique biologique « (**P**, **T**, **org**, **U**, **etc.**) ». Le terme « **P** » désigne ici ce que l'on pourrait traduire en langage naturel par la relation «… est une partie de … », que ce soit en un sens spatial, dit Woodger, ou temporel. Ainsi, on peut définir des individus « biologiques » x et y au sujet desquels on pourra écrire « x**P**y », à savoir « x est une partie de y ». Le terme « **T** » désigne la relation de précession dans le temps : « … est avant … »[7]. On peut déjà dire que l'on forcera « **T** » à être une relation formelle antisymétrique (puisque le temps biologique est irréversible). On peut définir ensuite « **org** » une classe d'individus dite classe des « unités organisées » tout au long du temps. Une cellule ou un organisme entier sont ainsi des membres de « **org** ». On peut définir ensuite la « **tranche** » (« ***slice*** ») d'une unité organisée (c'est-à-dire d'un membre de « **org** ») comme un état momentané de cette unité. Cela permet à Woodger d'instaurer ensuite une relation

[1] [Woodger, J. H., 1937], p. x.
[2] [Woodger, J. H., 1937], Appendix E, pp. 161-172. Tarski y développe la relation « **P** », « partie de », de Woodger en l'intégrant dans le formalisme de S. Lesniewski. Pour une bonne présentation de la méréologie de Lesniewski et pour une réflexion sur ses implications philosophiques, voir [Parrochia, D., 1991], pp. 187-201.
[3] "the form of biological fact", [Woodger, J. H., 1937], p. 16.
[4] [Woodger, J. H., 1937], p. 16.
[5] [Woodger, J. H., 1937], p. 11.
[6] [Woodger, J. H., 1937], p. 55. C'est Woodger lui-même qui choisit d'indiquer en caractères gras les noms des relations et des classes qu'il définit.
[7] Nous adaptons les expressions venant de l'anglais pour les rendre plus lisibles. Voir [Woodger, J. H., 1937], p. 56.

d'ordre grâce à « **T** » entre les « **tranches** » d'une unité. Le terme « **U** » désigne une relation de division cellulaire ou de fusion cellulaire ou encore de filiation, en fait un rapport d'interaction biologique de quelque forme que ce soit, entre x et y. Enfin, « **cell** » désigne la classe des unités organiques temporellement étendues et possédant une « **tranche** » de début et une « **tranche** » de fin. Woodger définit ainsi un grand nombre de relations et de classes sur le même principe.

Au moment où il définit ses relations formelles, Woodger restreint également leur pouvoir combinatoire en leur donnant des propriétés variées ayant un sens biologique comme c'est le cas pour la relation temporelle « **T** » qui est définit, de façon assez naturelle, comme antisymétrique. Il peut ainsi décider que telle relation sera symétrique, antisymétrique ou transitive, que des relations de relations seront isomorphes ou non, etc. Et ayant fait cela, il peut en effet appliquer, toujours dans l'esprit des *Principia*, le « calcul des relations » aux cellules, aux agrégats de cellules, aux organismes, etc. : il peut donc trouver des théorèmes « biologiques » totalement *a priori* à partir de la combinaison logique et du calcul logique de ces relations et de leurs capacités ou de leurs contraintes formelles. Par exemple, Woodger s'avance assez loin dans la fondation logiciste des règles de la génétique mendélienne. Nous ne les présenterons pas dans le détail car cela dépasserait notre propos. Mais il faut savoir que ses résultats sont décevants car ils n'apportent pas de connaissances réellement nouvelles. Ils se limitent à symboliser puis à retrouver un certain nombre de grands faits connus. Il lui faut en effet définir beaucoup de types de classes donc beaucoup de symboles différents et Woodger ne fait là que suivre de façon opportuniste la connaissance génétique déjà reconnue. Nous allons voir ce qu'il en est de ce qui nous concerne davantage dans notre enquête : l'embryologie et la théorie morphogénétique.

Le cas de l'embryologie : augmenter la complexité sans recourir au vitalisme

Selon Woodger, lorsque l'on s'attaque à l'embryologie, on se trouve face à une difficulté supplémentaire : dans ce domaine de la biologie, la terminologie serait encore plus floue qu'ailleurs[1]. Il avoue n'avoir pas encore pu correctement formaliser cette partie de la biologie. Si l'on tient cependant à la formaliser, l'embryologie doit d'abord, selon lui, être conçue comme une sous-division de la physiologie. Et, à ce titre, son problème principal consiste à comparer une « **tranche** » temporelle d'un tout avec une autre « **tranche** » temporelle de ce même tout, en considérant la transformation progressive de l'une en l'autre au travers de « **tranches** » intermédiaires[2]. La distinction entre l'embryologie et la physiologie réside alors dans le fait que la première s'occupe de « **tranches** » embryonnaires alors que la seconde s'occupe de « **tranches** » adultes[3]. Mais Woodger se rend compte que son système « (**P**, **T**, **org**, **U**, **etc.**) » ne donne pas encore la possibilité d'exprimer des relations entre différents degrés de « complexités structurelles »[4] pour un même organisme. Il définit donc la relation « **H** » qui va exprimer une relation qui correspond en langage naturel à « … est d'ordre structurel plus élevé que … » ou « …est de plus grande complexité structurelle que … »[5]. Cette relation doublée d'un recours à la relation « **T** » permet à son tour de définir un domaine de « **tranches** » embryonnaires

[1] [Woodger, J. H., 1937], p. 121.
[2] [Woodger, J. H., 1937], p. 122.
[3] [Woodger, J. H., 1937], p. 122.
[4] "structural order", "structural complexity", [Woodger, J. H., 1937], p. 122.
[5] [Woodger, J. H., 1937], p. 122.

temporellement ordonnées (ou domaine de développement d'un tout) baptisé **Dev**. Dans ce domaine, on a donc des « **tranches** » d'un même tout (ou unité organique) qui figurent les étapes successives de son développement. Mais il doit y avoir d'autres relations entre ces tranches si l'on veut rendre compte un tant soit peu des divers processus embryologiques. Woodger écrit ainsi :

> *« Une tranche d'un tout sera composée en général de :*
> *(1) tranches de « parties de cellules » (« **cp** ») distribuées en*
> *(2) un nombre fini de « tranches de cellules » qui, dans leurs relations spatiales mutuelles constituent*
> *(3) une unique configuration cellulaire à laquelle peuvent être associées*
> (4) *des parties telles que des fibres de tissu conjonctif, du cartilage et une matrice osseuse, des fluides corporels extra-cellulaires (le plasma du sang), etc., qui n'ont pas été définies dans le système et que l'on peut qualifier collectivement de 'constituants' afin de les distinguer des classes de parties que nous avons définies. »*[1]

À partir de là tout l'enjeu de l'embryologie formalisée va consister, selon Woodger, à prendre en compte la transformation d'une tranche en une autre au moyen de l'un des trois grands processus suivants qui définissent la problématique de l'embryologie :

1) l'augmentation du nombre de tranches de cellules (croissance cellulaire),
2) la transformation de la configuration cellulaire d'une tranche à l'autre (modes de développement des parties de cellules),
3) l'élaboration de types de cellules spécifiques, cela impliquant la production de « constituants » par le processus de la sécrétion (établissement du type histologique de la cellule et des produits de la cellule),[2]

Ce dernier point est essentiel à prendre en compte dans la mesure où les processus de différenciation cellulaire sont une des clés de l'embryologie. Or, Woodger insiste beaucoup sur la nécessité qu'il y aurait à définir et à clarifier les multiples différences qui existent entre les cellules afin de prendre en compte les différences entre leurs comportements. Selon lui, il y a en effet trois types possibles de différences entre les cellules : au regard de la durée (différence entre la première tranche temporelle et la dernière), au regard du changement de volume défini comme le rapport entre le volume de la dernière tranche de la cellule et celui de la première, enfin au regard de leurs composants discontinus (différence histologique)[3]. C'est l'occasion pour Woodger d'insister sur l'importance d'une approche *relationnelle* pour ces processus d'embryogenèse et de morphogenèse[4]. En s'appuyant sur une telle formalisation des *relations* entre cellules et des *relations* entre cellules et parties des cellules, il est ainsi possible, selon lui, de réfuter ce qu'il appelle le « vieux dogme vitaliste ». Selon ce « dogme », un système physique ne peut augmenter

[1] "A slice of a whole will consist in general of : (1) slices of cell-parts (**cp**) distributed among (2) a finite number of cell-slices which, in their spatial relations to one another constitute (3) a single *cell-configuration*, with which may be associated (4) such parts as connective tissue fibres, cartilage and bone matrix, extra-cellular body fluids (blood plasma), etc., which have not been defined in the system and which we can collectively call 'constituents' to distinguish them from the classes of parts we have defined", [Woodger, J. H., 1937], p. 123.
[2] [Woodger, J. H., 1937], p. 124.
[3] [Woodger, J. H., 1937], p. 125.
[4] [Woodger, J. H., 1937], p. 126.

à lui seul son degré de complexité[1]. Voici comment il pense pouvoir le réfuter[2]. Il suffit d'abord de partir de deux types différents de tranches de cellules occupant une tranche d'un tout organique. On suppose que ces deux types sont ségrégés spatialement d'une façon telle que l'on puisse parler de deux tranches différentes de parties du tout (étape d'hétérogénéisation minimale si l'on peut dire). On suppose ensuite que leur configuration mutuelle est instable de sorte qu'une de ces parties (d'un type différent donc), vis-à-vis de l'autre partie, entre dans une relation telle que ses propres tranches de cellules influencent *seulement quelques unes* des tranches de cellules de l'autre partie mais *pas toutes*[3], par exemple, écrit Woodger, « au moyen des sécrétions élaborées en elles, comme cela semble être le cas dans les expériences de l'organisateur »[4]. Et cette relation peut ainsi donner naissance à un autre type de cellule (et non pas nécessairement à des sécrétions de même niveau et de même classe symbolique).

On peut donc représenter l'augmentation du nombre de types de cellules dans un tout organique sans recourir à autre chose qu'à des règles relationnelles. *On peut représenter l'accroissement du degré de complexité d'un tout, donc son développement, sans en appeler à un principe vital*. Nous aurons noté que Woodger, en faisant une allusion à peine voilée aux récents travaux d'embryologie chimique de son collègue Waddington, arrive ainsi à marier un état contemporain du savoir embryologique avec sa proposition de formalisation. Car ce que permet en effet de façon inédite le formalisme des relations c'est la mise en rapport direct (quoique seulement symbolique) d'une unité organique fonctionnelle d'un degré de complexité élevé avec un *constituant* biochimique d'une autre unité organique fonctionnelle, d'un degré de complexité inférieur donc, pour produire une autre sorte de cellule. Il y a là quelque chose de comparable à une relation de syntaxe à sémantique chez Carnap, ou à une relation, réglée par avance de façon axiomatique, entre des types différents de classes, comme dans la théorie des types de Russell. Woodger propose d'utiliser la maîtrise que l'on a, au niveau symbolique, de ces rapports réglés entre types de classes pour exprimer les rapports entre le domaine de complexité de la physiologie embryologique et celui de la biochimie des processus d'induction organogénétique. Puisque l'induction organogénétique n'est pas le produit d'une interaction entre cellules mais entre une cellule et une « partie » ou même certains composants (biochimiques) d'une autre cellule, il y a moyen de s'élever dans la hiérarchie du langage formel biologique. Cette élévation dans les types formels est ce qui reflète l'élévation dans la « complexité morphologique »[5]. Et le vitalisme est réfuté, selon Woodger, parce qu'il n'y a pas eu besoin de supposer autre chose que des relations logiques. Avec lui, le logicisme se présente donc comme un moyen non mécaniste de réfuter le vitalisme.

Pour clore la section consacrée à l'embryologie, Woodger, se fait l'écho de trois problèmes qui restent selon lui à clarifier et à résoudre prochainement en embryologie et morphogenèse :

1) trouver une « géométrie adéquate »[6] pour pouvoir plus précisément comparer les configurations cellulaires et tenir compte des déformations qu'elles subissent.

---

[1] Il cite ainsi Hans Driesch en allemand et ses « prétendues preuves du vitalisme » ("so called proofs of vitalism") : „Im Laufe des Werdens kann sich der Grad der Mannigfaltigkeit eines Systems nicht von selbst erhöhen" [citation sans lieu, ni date ; notre traduction : « Dans le cours de son devenir le degré de multiplicité d'un système ne peut pas s'accroître de lui-même »], [Woodger, J. H., 1937], p. 127.

[2] Dans ce passage, nous simplifions et traduisons à la fois un passage difficile. D'où l'absence de guillemets. Voir [Woodger, J. H., 1937], p. 126.

[3] [Woodger, J. H., 1937], p. 126. C'est nous qui soulignons.

[4] "as seems to be the case in the organizer experiments", [Woodger, J. H., 1937], p. 126.

[5] "morphological complexity", [Woodger, J. H., 1937], p. 130.

[6] "a suitable geometry", [Woodger, J. H., 1937], p. 128. Sur ce point, sa lecture de Weyl a pu l'inspirer.

2) étudier « les connexions entre les différences qui existent entre les cellules au regard de leur durée de vie et de leur changement de volume d'une part, et la déformation des configurations cellulaires d'autre part »[1]. C'est là renvoyer pour lui à l'étude de ce que l'embryologiste américain J. S. Huxley appelle la « croissance hétérogonique », c'est-à-dire à ce que Huxley et Teissier appellent déjà, d'un commun accord et depuis 1936, la « loi d'allométrie »[2].
3) augmenter notre connaissance au sujet des relations mutuelles entre les tranches de parties de cellules dans la configuration cellulaire.

Le premier problème renvoie, selon Woodger, au fait que l'on ne dispose pas d'un formalisme mathématique (et non symbolique), plus particulièrement *géométrique*, pour classer correctement les configurations cellulaires par étapes significatives. Donc, selon lui, pour certains processus d'influences et d'évolutions spatiales, la symbolique logique et relationnelle ne peut pas se passer de la géométrie : elle doit s'appuyer sur des classifications géométriques préliminaires pour construire *ensuite* des classes biologiquement significatives et combinables formellement. En ce qui concerne le second problème, Woodger considère qu'il lui est possible de démontrer formellement la loi d'allométrie en utilisant des hiérarchies entre parties d'organismes au regard de leur durée et de leur ratio de croissance en volume. Il faut pour cela ajouter ce qu'il appelle un « axiome de continuité de la croissance cellulaire ». Cet axiome de continuité, on le comprend, permet en effet de rendre *métriques* les relations d'ordre qui sont d'abord seulement *logiques* dans son système, et donc de retomber naturellement sur ce que Teissier appelle la « loi la plus simple » de croissance dysharmonique. Avec son système formel, Woodger prétend donc « démontrer » formellement la loi d'allométrie. Enfin, le troisième problème lui semble sur la bonne voie grâce à la mise en évidence expérimentale de zones appelées « organisateurs » et induisant l'organogenèse selon un processus où des substances chimiques peuvent suffire à l'induction.

Complexifier la « théorie des homologies » de d'Arcy Thompson

Nous n'exposerons pas davantage ici le système général de Woodger. Mais ce qu'il faut en comprendre principalement, c'est que ce biologiste-philosophe, adepte des thèses de Whitehead et du positivisme logique, tire en fait un très grand parti des relations « d'unité à pluralité » (« *one to many* »)[3] et de leurs combinaisons, telles qu'elles apparaissent par exemple dans les relations de filiation, en génétique mais aussi dans toute la biologie. D'une part, en effet, il peut y avoir plusieurs *rejetons de* x, mais aussi plusieurs *parties de* y, de même qu'il peut y avoir plusieurs « tranches » embryonnaires successives et à la complexité croissante (donc sans isomorphisme de l'une à l'autre), etc. Sur ce dernier point, Il est frappant de remarquer que l'approche spéculative de Woodger répond à l'approche tout aussi spéculative, mais pour d'autres raisons, de d'Arcy Thompson et tend à la rectifier. Aidé par sa formalisation rigoureuse, Woodger peut en effet

[1] "a study of the connexion between differences between cells with respect to time-length and volume-change on the one hand, and the deformation of cell-configurations on the other", [Woodger, J. H., 1937], p. 128.
[2] Voir *supra*.
[3] Dans *La syntaxe logique du langage,* Carnap insiste beaucoup sur le fait que l'abandon de la forme logique « sujet-prédicat » ouvre effectivement la logique à la théorie de relations non seulement bilatérales mais aussi et surtout multilatérales. Voir sur ce point [Carnap, R., 1934, 1937, 2002], §71a, p. 260. Selon nous, sans que Woodger ne le dise explicitement, l'abandon de la forme logique bilatérale « sujet-prédicat » et le passage au calcul des propositions sont sans doute parmi les raisons majeures pour lesquelles, dans les années 1930, il peut paraître intéressant de tenter de logiciser de nouveau une science de la nature comme la biologie, surtout après ce qui semblait être les échecs des représentations logiques étroitement mono-prédicatives d'Aristote en ce domaine.

revenir sur le sens formel de la « théorie des homologies » que défendait ce dernier. Dans ce que propose d'Arcy Thompson, selon Woodger, on n'a affaire qu'à un cas particulier d'une théorie des correspondances terme à terme. Ainsi, selon cette théorie, les propriétés morphologiques évoluent certes lors de la croissance et du développement, mais la morphologie ne peut y voir augmenter son degré de complexité[1]. De plus les transformations morphologiques conformes aux relations d'homologie, d'un point de vue formel et toujours à cause de cette biunivocité, semblent toujours symétriques et transitives, sauf à ajouter des restrictions artificielles pour leur sens de parcours. Or, à ce niveau, Woodger utilise le même argument que celui qu'il avait employé précédemment contre le vitalisme (même s'il ne cite aucunement d'Arcy Thompson dans ce passage et prend en cela un certain nombre de précautions oratoires) : son propre système, permettant de représenter des relations « d'unité à pluralité » est plus adapté. Il relie cela à la querelle qu'il avait soulevée lui-même huit ans plus tôt : passer à la formalisation des types et des classes hiérarchisées d'entités organiques et biochimiques, c'est contribuer à lever certaines ambiguïtés dommageables au langage biologique[2].

D'autre part, ces relations entre tranches organiques[3] peuvent être *combinées*. Or ces combinaisons donnent toujours lieu à une réduction logique (de par les démonstrations de théorèmes dont l'ouvrage est émaillé) et donc à un calcul formel et à une prévision. Cela est une nouveauté indéniable par rapport aux relations fonctionnelles (par exemple analytiques) habituelles pour lesquelles en général, les combinaisons rendent très vite inextricables les expressions comme les calculs[4]. Cela donne à la méthode axiomatique *une puissance de calcul* que n'ont pas les méthodes analytiques. En passant du réalisme représentatif à la symbolique du cognitif qualitatif et relationnel, la formalisation biologique gagne donc en *calculabilité*. Mais, bien qu'il puisse en droit le devenir grâce à l'évolutivité et à la puissance algébrique que lui donne son assise axiomatique, ce calcul n'est *pas d'abord un calcul numérique*, loin s'en faut. Donc il ne met pas le théoricien de plain-pied avec l'expérimentation objective, c'est-à-dire avec l'expérimentation faite avec des *objets* susceptibles de mesurer et de *quantifier* le corps vivant. À la différence de la biophysique certes peut-être encore trop géométriste et réaliste-matérialiste de Rashevsky et, en ce sens « en retard » sur les formalismes disponibles à la même époque dans le « réservoir des formes logico-mathématiques » (selon l'expression d'H. Weyl et que Bourbaki reprendra), la biologie axiomatique de Woodger ne se prête pas à un dialogue facile et constructif avec la biométrie de son temps ni avec l'analyse statistique et numérique des données biologiques. La rançon de la calculabilité intégrale y est donc très élevée : les symboles grossiers deviennent essentiellement cognitifs-qualitatifs et ils ne sont pas d'emblée opérationnels pour l'empirie.

---

[1] Rappelons que, dans les années 1940, Conrad Hal Waddington était sur ce point d'accord avec Woodger qu'il avait lu. Voir, *supra*, le passage de Waddington cité dans notre analyse des travaux de Cohn. Rappelons également qu'au sujet de ce problème que Woodger soulève donc clairement dès 1937, Waddington prônera une issue topologique alors que Cohn introduira en biologie théorique les principes de la décomposition fonctionnelle venus de l'ingénierie des systèmes complexes.

[2] [Woodger, J. H., 1937], p. 138.

[3] Ce terme de « boucherie » ou de « charcuterie » est finalement bien adapté lorsque le couperet de l'atomisme logique est appliqué au corps vivant ! Encore faut-il disposer de tout l'art du boucher pour savoir bien trancher au niveau précis des articulations *naturelles* du corps. Ainsi, le philosophe, pour Platon, doit-il être un bon « cuisinier » du discours et des idées pour démonter les raisonnements sans défigurer les idées qui y sont articulées. Voir *Phèdre*, 265d-266c. En ce sens, il y a chez Platon comme une « embryologie de la pensée » puisqu'il décrit la genèse de la pensée, à l'image de celle d'un corps, comme un développement différenciant et articulant. Et Platon ne peut justement pas être qualifié d'« atomiste platonicien » parce qu'il a une représentation dynamique, processuelle, donc passablement vitaliste de ce point de vue là, de la pensée.

[4] Comme les équations aux dérivées partielles qui sont des relations fonctionnelles multilatérales mais difficilement solubles.

Par là, on voit que la méthode axiomatique et logiciste de Woodger ne pouvait donner lieu à des confirmations empiriques rapides, nouvelles et ponctuelles. Son discours parut ainsi bien trop spéculatif. Certains de ses collègues biologistes le taxèrent même de « philosophe »[1], sans autre forme de procès. À penser le réel vivant uniquement en terme de ce qui est logique ou linguistiquement bien fondé, on s'expose à n'avoir plus de prises sur lui. À partir de là, il nous est possible de comprendre pourquoi, historiquement, le projet de Woodger, d'allure si brillante et novatrice au départ, est resté en fait quasiment lettre morte pendant près de trente ans, tout au moins dans la biologie du développement[2]. Il faudra notamment la mise à disposition d'un *objet* ou plutôt d'un *instrument* nouveau pour que l'empirie semble pouvoir s'élever à ces hauteurs formelles auxquelles Woodger avait voulu placer d'un seul coup et sans doute naïvement l'ensemble du discours biologique. Nous voulons parler de l'ordinateur.

[1] L'historien des sciences Scott F. Gilbert commet lui-même l'erreur en le qualifiant exclusivement de « philosophe ». Voir [Gilbert, S. F., 1988], p. 318. Evelyn Fox Keller le suit sur ce point : [Keller, E. F., 2002, 2003], p. 329.

[2] Il faudrait bien sûr nuancer ce propos en rappelant que l'approche de Woodger n'a pas cessé d'avoir quelques disciples dont John R. Gregg de l'Université *Duke*, et, plus tardivement, Aristid Lindenmayer, sur la carrière et les travaux duquel nous reviendrons en temps opportun. Voir [Gregg, J. R. et Harris, F. T. C., 1964], p. 4. Mais, d'une façon qui nous paraîtra bientôt très significative, ces adeptes ne reconnaîtront leur dette de façon éclatante que lors de la publication d'un livre collectif, à l'occasion du 70ème anniversaire de Woodger, en 1964 : [Gregg, J. R. et Harris, F. T. C., 1964].

CONCLUSION : formalisations de la morphogenèse avant l'ordinateur, déracinement et résistances

Avant d'en venir à un bilan sur l'état des modèles et des théories mathématisées de la morphogenèse autour de 1955, il est instructif de revenir un moment sur le contenu de la formation dispensée par Rashevsky et ses pairs au département que l'Université de Chicago avait tout particulièrement créée pour eux : le *Committe on Mathematical Biology*. Dans quel esprit la biologie théorique forme-t-elle ses élèves ? C'est en 1947 que Rashevsky a créé à Chicago une formation doctorale, sans doute la première au monde, de « biologie mathématique ». Or, ce que dispense ce cursus de formation est en lui-même révélateur des attentes épistémologiques de son fondateur et de ses collègues. C'est en cela qu'il nous intéresse. Rashevsky a dû toute sa vie lutter pour faire entrer cette discipline dans le panthéon des matières académiques traditionnelles[1]. Pourtant, avec son approche et son cursus de formation, Rashevsky propose une biophysique qui tranche avec celles qui se développent dans d'autres cadres et d'autres problématiques.

La biophysique unitaire et les biophysiques régionales

Contre l'opinion qui prévalait dans les années 1930-1940, Rashevsky a en effet toujours pensé que, pour ce type de recherches, il ne suffisait plus d'une coopération entre un physicien et un biologiste, l'un ignorant l'essentiel de ce qui faisait la spécialité de l'autre. Pour lui, la coopération entre spécialistes monodisciplinaires ne semble plus de mise. L'organisation de son cursus a donc été façonnée en fonction de ce postulat qu'il juge indépassable : « chacun des scientifiques qui coopèrent doit avoir une *compréhension complète* de *tous* les aspects du problème »[2]. Il ajoute : « c'est seulement à cette condition que chacun peut produire un travail *créatif* »[3]. Rashevsky en veut pour preuve les développements enregistrés à ce jour par son équipe : il n'y aurait eu de travaux réellement importants que de la part de personnes aguerries dans les deux disciplines que sont la physique et la biologie.

Ce postulat résume bien l'esprit de la formation qu'a instituée Rashevsky au *Committee* : les étudiants n'obtiennent leur doctorat qu'après avoir suivi 14 modules d'enseignement avancé en biologie et 14 également en physique. On leur enseigne ainsi « la biologie générale, la physiologie générale, la physiologie humaine, la génétique, la génétique physiologique, l'embryologie, la biochimie, etc. »[4]. En physique, on leur enseigne « le calcul, les équations différentielles, la théorie des fonctions, les probabilités, les équations intégrales, la théorie cinétique, la thermodynamique,

---

[1] En 1965, dans la préface du livre synthétique qu'ils ont codirigé, Talbot H. Waterman et Harold J. Morowitz, rattachés respectivement au « département de biologie » et au « département de biologie moléculaire et biophysique » de Yale s'expriment ainsi : "For a number of reasons complete coverage and a strictly unified point of view have not been achieved. To begin with, theoretical and mathematical biology is not yet so well defined or well developed that it is a universally recognised, strongly interconnected, coherent area of science […] Consequently, choices of inclusion and emphasis both by the editors and by the authors reflect this somewhat unsettled and controversial character of the subject", [Waterman, T. H. and Morowitz, H. J., 1965], p. vii.

[2] "But each of the co-operating scientists must have *complete understanding* of *all* the aspects of the problem ", [Rashevsky, N, 1960b], p. 147. C'est l'auteur qui souligne.

[3] "Only then can each do *creative* work", [Rashevsky, N, 1960b], pp. 147-148. C'est l'auteur qui souligne.

[4] [Rashevsky, N, 1960b], p. 148. Notre traduction.

l'électrodynamique, la mécanique quantique, etc. »[1]. Rashevsky ajoute que « l'on demande aux étudiants de prendre en main du travail de laboratoire même s'ils sont entraînés comme théoriciens »[2]. Il argumente alors ainsi : on ne peut s'instituer théoricien « si l'on n'a pas atteint la pleine compréhension des faits expérimentaux et des méthodes »[3].

Rashevsky entretient l'idée que l'on ne peut faire un bon théoricien si l'on ne travaille pas dès le départ à produire un esprit qui aura une connaissance et une maîtrise intellectuelle complète de tous les domaines qu'il croisera dans son champ de recherche. Comme la théorie qu'il recherche, la position du biologiste théoricien est donc clairement de surplomb. Le théoricien de l'avenir de la biologie, c'est l'homme qui saura transgresser les frontières parce qu'il se sentira chez lui (« *equally at home* »[4]) dans les deux disciplines. Et le bon théoricien est l'homme qui, comme Rashevsky lui-même de son point de vue, dispose d'une grande « créativité » formelle. Rappelons-nous que les premiers travaux de Rashevsky et de ses collègues s'étaient caractérisés par une débauche de tentatives théoriques et formelles toutes diversement inspirées de la physique. Le transfert de concepts et de méthodes serait donc favorisé par l'égale maîtrise des domaines concernés. Et c'est donc ce transfert qui serait en lui-même créatif. Mais qu'est-ce qu'une créativité qui fait long feu et n'aboutit pas à un programme de recherche suivi ainsi que cela a souvent été le cas ?

En tous les cas, la créativité est donc bien pour Rashevsky le critère majeur. C'est ce critère qui au fond justifie l'exigeant postulat pédagogique que nous avons rappelé. Car la créativité est censée venir de l'exhaustivité des connaissances, de leur caractère encyclopédique. Ce qui, au regard d'un bon sens déjà ancien (une tête bien faite contre une tête bien pleine), est pour le moins discutable. Car, dans la conception de ce cursus, la créativité n'est pas directement favorisée ni cultivée pour elle-même, mais elle est indirectement préparée par une espèce d'ingurgitation maximale de matières au départ très différentes les unes des autres. Il semble que l'on espère par là qu'une sorte d'alchimie créative, de « précipitation chimique » va s'opérer du fait de cette impressionnante masse de connaissances. Le postulat pédagogique de Rashevsky paraît supposer une espèce de foi en l'émergence spontanée d'une créativité dans le terreau même de cette maîtrise totale des connaissances d'une époque, par des effets de transferts quasi naturels.

Mais en fait, Rashevsky a surtout en vue l'objet d'étude qu'il a lui-même intellectuellement expérimenté et prôné dès ses débuts : même si cela ne transparaît pas directement dans le texte de 1960, c'est bien le contenu épistémologique de son projet de « biophysique » qui détermine aussi et principalement la forme du cursus qu'il impose à Chicago. Nous avons déjà vu pourquoi et dans quelle mesure la biologie mathématique doit selon lui s'inspirer des méthodes de la physique. Le statut épistémologique des deux dominantes (physique et biologie) de ce cursus n'est en réalité pas du tout le même. Cela est d'importance. Il en résulte tout naturellement l'idée que l'étude de la physique est comme un prélude méthodologique aux études biologiques. Le très large éventail du cursus biologique, en revanche, n'est là que pour dessiner *a priori* autant de domaines d'étude à défricher pour une fois sérieusement (parce que théoriquement) avec les bons outils de formalisation donnés, pour leur part, dans le cursus de physique. D'où l'importance donnée aux méthodes de calcul. Mais, à son tour la physique n'est la caisse à outils formels de la biologie que parce que la biologie est en droit réductible à la physique. Voilà donc en fait le postulat d'égalité

[1] [Rashevsky, N, 1960b], p. 148. Notre traduction.
[2] "Our students are also required to take biological laboratory work, even though they are trained as theoreticians", [Rashevsky, N, 1960b], p. 148. Notre traduction.
[3] "In biology, like in physics, a useful theoretical work is possible only with a full understanding of experimental facts and methods", [Rashevsky, N, 1960b], p. 148.
[4] [Rashevsky, N, 1960b], p. 148.

gnoséologique, qui se trouve au fondement de l'exigence pédagogique de Rashevsky, fondé lui-même sur le postulat, plus profond, d'une réductibilité ontologique de principe.

Rashevsky termine enfin son manifeste pour une formation bidisciplinaire intégrale sur le rappel d'un des inconvénients matériels majeurs que présente ce genre de formation exigeante : la durée de la formation et donc, pouvons-nous ajouter, le coût inévitable qu'elle entraîne. C'est selon lui l'obstacle principal à leur plus ample développement. Ce serait également la raison essentielle pour laquelle ce type de cursus n'existe encore qu'à Chicago. En revanche, on voit que l'obstacle sans doute aussi important que serait un désaccord avec ses propres principes épistémologiques n'est pas abordé par Rashevsky, alors que, dès les années 1950-1960, d'inévitables questions peuvent se poser. Après tout, cette exhaustivité revendiquée dans les connaissances transmises est-elle si complète qu'il le prétend ? Pourquoi en effet ne peut-on également proposer des modules de sciences de l'ingénieur (comme la résistance des matériaux) ? Pourquoi faut-il se concentrer sur la physique fondamentale au point de donner des cours poussés de mécanique quantique ? Pourquoi ne pas accentuer également la présence de la chimie ou de la biologie moléculaire naissante ? Son collègue de Yale, Harold J. Morowitz, n'est-il pas, à la même époque, en charge d'un département de « *biologie moléculaire* et biophysique » [1]? C'est donc que la « biophysique » a été définie à Yale d'une façon différente : on y insiste sur le fait que c'est pratiquement exclusivement à une échelle chimique ou moléculaire (la biologie moléculaire étant en plein développement) que le dialogue entre physique et biologie pourra s'instaurer et que la biologie pourrait à terme gagner en rigueur théorique et formelle. Britton Chance, professeur au département de « biophysique et *chimie physique* »[2] de l'Université de Pennsylvanie et lui-même titulaire d'une thèse en physique comme d'une thèse en biologie depuis le début des années 1940, mêle pour sa part exclusivement la biophysique, au sens cette fois-ci médical du terme (utilisation d'instruments de mesure sensibles à des phénomènes physiques sur des tissus ou organes), et les équations de cinétique biochimique. Kenneth S. Cole (qui appartient à la génération précédente et est actif depuis les années 1920) s'est de lui-même rattaché sur le tard au courant de la biophysique et de la biologie mathématique. Mais, en 1960-1965, il travaillera encore principalement sur l'influx nerveux et sa représentation électrique par des circuits analogues, donc dans le domaine de la neurophysiologie physique et analogique. Or, dans ce cadre-là, les débuts de l'électrophysiologie remontant à la fin du 18ème siècle, avec Galvani par exemple, et étant donc contemporains et communs aux débuts de l'électricité conçue comme discipline de la physique, la question de la réduction des problèmes de la physiologie à la physique ne se pose pas du tout pour lui dans les mêmes termes que ceux que choisirent d'Arcy Thompson ou Rashevsky. En tout cas, elle ne se pose pas en des termes polémiques puisqu'il semble dès le départ y avoir complète homogénéité entre phénomènes électriques physiques et phénomènes électriques biologiques. Dans ce secteur de la biologie, où la forme n'est pas prioritairement prise en compte, le désir de mathématiser ne pose donc pas de problèmes épistémologiques spécifiques dans la mesure où ces problèmes (qui existent) sont déplacés vers ceux, plus généraux mais plus anciens et donc laissés en sommeil par la communauté scientifique du 20ème siècle, de la mathématisation des représentations des phénomènes physiques.

L'approche épistémologique de Rashevsky est donc loin d'être unanimement partagée dans les milieux de la biologie mathématique inchoative. Mais comme on peut aisément le comprendre, et par contraste avec les approches plus biochimiques de Morowitz et Chance, ou plus électrophysiologiques de Cole, pendant une longue période, c'est tout de même surtout dans les

[1] [Waterman, T. H. and Morowitz, H. J., 1965], p. v. C'est nous qui soulignons.
[2] [Waterman, T. H. and Morowitz, H. J., 1965], p. v. C'est nous qui soulignons.

recherches de Rashevsky et celles de ses collègues qu'une attention à la forme des vivants, doublée d'un souci de la représenter mathématiquement, se fait jour. Les biophysiciens des autres écoles de pensée, comme Morowitz, Chance ou Kole se penchent en effet quasi-exclusivement sur des fonctionnements sans chercher à recouper leur approche biophysique avec des études d'anatomie, de morphologie ou d'analyse statistique des formes. Ils se situent donc nettement et sciemment du côté de la physiologie ; et ils laissent à l'embryologie et à l'anatomie le soin de mathématiser elles-mêmes, si elles en sentent le besoin, leurs propres concepts. Selon eux, si la mathématisation doit apparaître chez elles, elle doit probablement venir de l'intérieur de ces disciplines, d'une nécessité ou d'une impulsion intrinsèque à l'une ou à l'autre mais sans doute pas d'une sollicitation de l'extérieur. Une telle mathématisation serait à leurs yeux prématurée. En attendant, la physiologie leur paraît donc un sous-secteur de la biologie générale particulièrement privilégié et à partir duquel une mathématisation est d'ores et déjà envisageable.

Pour des raisons finalement essentiellement philosophiques, seule l'équipe de Rashevsky ne craint pas, avec un succès très mitigé et controversé, de proposer des représentations mathématisées permettant également de dialoguer avec les sciences descriptives des formes et de leur développement qui, quant à elles, recourent massivement aux statistiques.

Bilan sur les théories et les modèles de la morphogenèse avant l'ordinateur

Maintenant que nous avons restitué quelques uns des jalons des premières représentations mathématisées de la forme et de la croissance dans la biologie végétale et animale avant l'avènement de l'ordinateur, il nous est rétrospectivement possible de dégager les quelques tendances relativement communes à toutes ces approches afin de mieux saisir le contexte technique et intellectuel dans lequel les ordinateurs ont dû progressivement s'infiltrer dans les milieux de la recherche en morphologie et en morphogenèse quantitatives et se sont peu à peu imposés aux chercheurs.

Tout d'abord, que ce soit pour la morphologie végétale ou animale, nous avons vu qu'une des tendances a été de dépasser la description statique (des premières lois phyllotaxiques par exemple) pour aller vers une description dynamique puis vers une explication de la forme par la genèse, c'est-à-dire par la croissance[1]. La morphologie, afin d'être plus quantitative, s'est donc progressivement adjoint les perspectives de la morphogenèse pour rechercher en quelque sorte ses causes et les quantifier rigoureusement. Il ne faudrait d'ailleurs pas oublier que la morphogenèse a connu un destin et un développement propres bien que sporadiquement croisés avec ces recherches quantitatives axées sur la morphologie[2]. Les recherches en morphogenèse n'ont pas toujours et uniquement cherché la mathématisation, bien entendu, loin s'en faut.

---

[1] Il faudrait distinguer ici la croissance de la multiplication. Cette distinction est depuis longtemps assez nette chez les biologistes quoique les phénomènes soient étroitement liés. La croissance désigne en général l'augmentation de taille (donc l'augmentation métrique) des êtres vivants. Comme l'indique André Mayrat, en biologie et donc au sens propre, elle désigne très précisément « l'accroissement progressif d'une unité biologique (ou liée à des phénomènes biologiques), se poursuivant sans perte d'individualité ni interruption de l'activité fonctionnelle », [Mayrat, A., Rollin, P. et Kahn, A., 1990, 1995], p. 1. En tant qu'elle forme un tout d'un point de vue fonctionnel, on peut néanmoins dire qu'une population croît, mais on doit dire qu'un virus se multiplie car, dans ce dernier cas, « à côté de l'unité mère servant de modèle se forme en effet, *par assemblage de ses éléments*, une autre unité qui ne s'individualise et ne devient fonctionnelle que brusquement, une fois complètement terminée », *ibid.* C'est nous qui soulignons. La multiplication produit donc une solution de continuité fonctionnelle, ce que ne fait pas une croissance. En conséquence de cette distinction nette, on voit qu'il paraît possible et même assez naturel d'attribuer essentiellement à cette continuité fonctionnelle le fait même de la croissance.

[2] En 1979, l'ingénieur agronome Philippe de Reffye rappellera qu'il existe désormais au moins quatre niveaux distincts d'approche de la morphogenèse : moléculaire (rôle des substances *chimiques* de croissance, de dormance …),

Ce qu'il faut dire, c'est que cette explication de la forme statique par des lois mathématisées de la croissance a pu d'abord se satisfaire d'une approche descriptive quoique déjà dynamique par les vitesses de croissance : on n'y perçoit pas encore une explication, mais déjà le filmage, en quelque sorte, d'une mise en forme. Or, dans ces différentiels de vitesse on pressent un fonctionnement organique. De l'appréhension dynamique pour elle-même, on passe à une appréhension mécanico-dynamique qui nous représente des mécanismes de croissance.

Pour tendre vers l'explication causale en effet, notamment en vue d'un diagnostic médical quantifiable, et c'est là la deuxième tendance majeure propre à cette période dans le domaine des représentations mathématisées des formes du vivant, la morphogenèse s'est elle-même progressivement fondée sur la prise en compte prioritaire du fonctionnement de l'organisme comme être vivant doté d'un métabolisme, c'est-à-dire sur une approche physiologique : la physiologie était réputée pouvoir ainsi expliquer la mise en forme organique. Pratiquement toutes les formulations mathématiques de la morphologie de cette époque sont en ce sens des lois construites à partir de considérations physiologiques. Mais la physiologie apportait avec elle sa tradition chimique, sa tradition physique et sa tradition électrique. Il y eut ainsi une biophysique chimique et moléculaire, une biophysique électrique et une biophysique mécanique. C'est plutôt cette dernière qui s'est intéressée très tôt aux problèmes de formes. Or, avec elle, la physiologie quantitative apportait inévitablement des questions philosophiques ainsi que des hésitations autour des principes d'optimalité hérités de la mécanique *via* les études physiologiques déjà anciennes (puisque nées au milieu du dix-neuvième siècle) du métabolisme et de la régulation. Pour confirmer nos dires en ce qui concerne la morphologie et plus spécialement les structures de ramification chez l'animal, il faudrait ajouter à nos quelques jalons la suite de l'histoire des recherches en phyllotaxie mathématique au cours de cette même période[1]. On y verrait, comme en physiologie humaine et plus particulièrement vasculaire, une convergence très nette entre la morphologie végétale quantitative et la physiologie végétale à partir des travaux de Hofmeister : de plus en plus, on tâche d'y expliquer par des modèles physiologico-mathématiques les processus graduels de mise en place de ces formes elles mêmes reconnues depuis longtemps par la morphologie descriptive. On pouvait de toute façon déjà la pressentir dans les travaux interdisciplinaires de Murray (1926) sur les processus de ramification organique (végétale ou animale) ou même sur la forme des plantes et des animaux de Rashevsky (1948) : l'un et l'autre jetaient ainsi un pont entre la ramification végétale et la morphologie animale mathématisées.

Statuts des divers formalismes avant l'ordinateur

Rétrospectivement, il nous faut dire que l'usage le plus ancien du terme « modèle » dans le domaine de la représentation mathématique des formes nous vient incontestablement des mathématiques descriptives de la biométrie anglo-saxonne, et notamment des travaux de R. A. Fisher. Il y a alors modèle parce qu'il n'y a justement pas théorie, parce qu'il n'y a pas, dans cette mathématisation, la représentation d'un scénario réaliste sous-jacent et qui prétendrait représenter

---

cytologique ou cellulaire (étude de l'anatomie et du fonctionnement des *cellules* particulièrement impliquées dans ces processus de croissance comme celles que contiennent les méristèmes d'une plante…), proprement morphogénétique (facteurs de différenciation et gradients morphogénétiques dans la plante…) et enfin botanique ou anatomique (description de l'émergence des organes ou des tissus et de leur devenir …). Voir [Reffye (de), Ph., 1979], p. 14.

[1] Roger Jean l'a retracée assez complètement dans son ouvrage de 1978 et dans son article commun avec I. Adler et D. Barabe : [Adler, I., Barabe, D. et Jean, R. V., 1997]. Il ne faut cependant pas oublier que ces publications servent d'introductions à une vision théorique personnelle et propre au chercheur en phytomathématique qu'est Roger Jean. Cette histoire est donc passablement orientée vers une fin qu'ordonne une perspective de recherche fondée sur des axiomes proches de la biologie relationnelle de Rashevsky et Rosen et dont il sera question plus bas.

le fonctionnement des éléments du réel d'une façon certes idéalisée mais de surcroît globalement ressemblante. Au contraire, avec la « loi hypothétique », il s'agit tout au plus de faire exister dans des mots quelque chose comme une « matrice de causalités » pour reprendre la terminologie de Fisher, c'est-à-dire une construction verbale dont les effets calculables soient structurellement similaires à ceux que l'on peut observer empiriquement à l'échelle des grands nombres. Cette similarité structurelle n'est que statistique. Elle n'a même pas besoin de s'autoriser d'une isomorphie sous-jacente. Le caractère uniquement informationnel de ce que rassemble en elle la « loi hypothétique » selon Fisher indique bien l'origine et la visée d'abord purement opérationnelle de cette technique d'extraction et de réduction de l'information empirique : il s'agit de faire parler l'expérience, d'entendre tout ce qu'elle dit mais rien que ce qu'elle dit. Il s'agit de mettre en forme en notre esprit ce qui n'est d'abord que cacophonie du fait de la complexité (au sens d'une intrication des chaînes de déterminismes) des phénomènes observés.

Cependant, l'analyse statistique des données hérite de la biométrie son désintérêt pour l'ontogenèse. Elle s'inscrit exclusivement dans une problématique d'interprétation de l'évolution des formes du *même* par le passage à l'*autre*, par la phylogenèse, donc par la prolifération. Ainsi, la forme n'y est pas tant interprétée du point de vue de la croissance de l'individu mais par la multiplication des individus. Là est notamment l'origine de la morphométrie ou morphologie statistique. En ce sens, elle renonce à se poser des questions de morphogenèse au niveau même de l'ontogenèse puisque la cause ou plutôt l'événement contigu de l'événement présent qu'elle collationne est un événement qui s'est produit dans un autre individu. Elle explique le même par l'autre. Elle s'appuie sur la théorie darwinienne pour ce faire. C'est en quoi elle est relationnelle par principe. Cependant la possibilité d'une mesure, donc la mathématisation métrique, est fondée sur la supposition qu'est toujours possible un décompte des concaténations d'une toujours même partie valant alors comme mesure-étalon. Cette partie elle-même, afin de pouvoir décompter, réduire au nombre, les parties analogues de l'autre individu, est donc considérée comme homogène à ces autres parties. En ce sens, il n'y a pas de mesure sans homogénéisation forcée, sans identification préalable des différents. En dernière analyse donc, l'analyse statistique identifie qualitativement les caractères pour pouvoir distinguer, pour discriminer et non pas directement pour théoriser ou contempler. C'est en ce sens qu'elle est, dès le départ, à visée opérationnelle. En effet, en mesurant, elle compare ce qui est mathématiquement comparable. C'est-à-dire qu'elle procède à une homogénéisation transversale des caractères morphologiques des individus les uns par rapport aux autres, mais elle laisse ce faisant dans l'ombre l'hétérogénéité longitudinale de l'individu par rapport à lui même, d'un organe à un autre, et d'un moment du temps à un autre moment du temps, au cours de son histoire. Or, c'est précisément cette hétérogénéité longitudinale, avec ses « relations d'un à plusieurs », qui est rebelle à la mathématisation immédiate. Et c'est bien elle qui excite l'intérêt de la biophysique mathématique de l'époque. Il y a là une lacune que la biométrie ne comble pas.

On peut dès lors comprendre que c'est précisément pour trouver un *horizon d'homogénéisation* capable de briser ces différences qualitatives internes à l'individu que, la biophysique de la morphogenèse a d'abord été vigoureusement réductionniste : elle cherchait des théories fondamentalement physiques pour des phénomènes biologiques, tâchant ainsi de ramener les différences qualitatives à des atomes de réalité pour lesquels il n'y aurait plus de qualités différenciées qui ne soient constructibles mathématiquement. C'est là tout l'enjeu du mécanicisme. Aussi Rashevsky a-t-il conservé très tardivement le terme de « théorie » pour désigner ses multiples tentatives de formalisation que nous qualifierions aujourd'hui et sans hésiter de « modèle mathématique ». Il connaissait pourtant l'usage du terme de « modèle » qui avait

cours dans les milieux de ce qu'il appelait la « biologie quantitative » et qu'il opposait alors à la « biologie mathématique » ou « biophysique ». C'est que la mathématisation devait, selon lui, d'abord passer par la théorisation physicaliste. La « théorie » désignait pour lui encore une représentation explicative idéalisée. C'était l'objectif final de toute science digne de ce nom. En tant que représentation cognitive, elle devait correspondre de près ou de loin aux processus sous-jacents. Elle devait les représenter, les refléter. Dans une théorie entendue en ce sens, la représentation se fait d'abord idéalisante et à destination des éléments constitutifs du phénomène global pour permettre la condensation abstractive. Selon le premier Rashevsky en effet, pour mathématiser la biologie, il faut aller aux *choses*, se les représenter et ensuite les idéaliser, mais il ne faut pas d'emblée, et comme de haut, idéaliser les seules *relations* entre les choses. Cela il le laisse à la thermodynamique, à la biométrie informationnelle ou à la dynamique des populations. Et il s'agit là toujours finalement d'une approche populationnelle. Car ayant idéalisé les choses elles-mêmes et leurs propriétés (d'où son physicalisme), les rapports que pourront entretenir ces éléments idéalisés seront ensuite nécessairement formalisables puisque standardisés, du moins le croit-il. *L'expression mathématique des relations entre les choses viendra, selon lui, tout naturellement de l'idéalisation préalable des propriétés intrinsèques des choses en relation.* La standardisation se fait donc à même la chose élémentaire dans cette perspective théorique (on y parle d'un réel élémentaire mais idéalisé il est vrai) alors qu'elle s'effectue plus en amont dans les relations entre les choses et dans l'impressionnisme et la nécessaire myopie de l'approche populationnelle, que ce soit en biométrie ou en dynamique des populations.

Il y a « théorie », dans ce cas-là, parce que ces idéalisations de choses sont supposées ressembler à une réalité qui forme par ailleurs comme un socle ultime. Ce socle ultime, car il y en a bien un pour la première épistémologie de Rashevsky, est le substrat physique. Une théorie biophysique est davantage *vraie* lorsqu'elle semble plus fondamentalement ancrée dans ce sol incontestable. On le voit, la première perspective de Rashevsky est encore très liée à la thèse classique de la vérité-correspondance alors que des contemporains biophysiciens comme H. J. Morowitz voyaient déjà la théorie « vraie » comme assimilable surtout à un système formel et déductif cohérent.

Cependant, ce socle physique, Rashevsky ne pouvait nier pour sa part qu'il vacillait depuis longtemps déjà. En tant que physicien de formation, il ne pouvait pas l'ignorer. Le mécanicisme de Loeb lui semblait déjà outrancier. N'oublions pas qu'il était doté d'une formation physique solide et qu'il avait travaillé sur les formalismes de la physique théorique récente, dont la théorie de la relativité qu'il avait longtemps méditée. Dès 1933, il a hésité lui-même à faire prévaloir les théories électriques de la cellule sur les théories mécaniques indiquant par là qu'invoquer la réduction de la biologie à la physique au début d'un siècle qui confirme le tableau d'une physique fragmentée avait quelque chose d'étrange. Certes, c'est le réductionnisme mécaniste qui l'a finalement emporté chez lui mais pour une décennie seulement. Il ne s'est pas maintenu fermement dans cette décision. Car l'obstacle qui a été pour lui le plus décisif est venu de l'intérieur de sa pratique de biologiste théoricien. Lorsqu'en 1948, il a voulu représenter mathématiquement des théories morphologiques et morphogénétiques précises et susceptibles de rencontrer l'expérience, il a cédé : il lui a semblé inévitable de se proposer des *formalisations fonctionnelles* intermédiaires. Par là, Rashevsky rejouait l'antique et cyclique rapprochement entre les sciences de la vie et les sciences de la conception humaine, mais dans un contexte nouveau, il est vrai : celui d'une perspective de mathématisation rigoureuse et opérationnelle à terme. Trouver des théories tout à la fois mathématiques et explicatives de la mise en place des dimensions métriques propres aux structures vivantes semblaient en effet une gageure pour la perspective mécaniste. Cet obstacle a

été analysé par Rashevsky. Il était pour lui clairement dû à deux problèmes : 1- celui de la difficile, voire de l'impossible idéalisation préparatoire des éléments en cause ; 2- celui du caractère *a priori* inextricable voire de l'inexistence même des mathématiques qu'il faudrait mobiliser pour condenser en des formules ces éléments formels. À ce moment-là, les deux étapes du processus de théorisation mathématique qu'il préconisait d'ordinaire se trouvaient donc l'une et l'autre en panne d'inspiration. Et de la physique, il ne semblait pouvoir attendre pour une fois aucun salut. Car à quelle interprétation physique, à quelle expérience sensible idéalisée rapporter chacun des éléments intervenant dans ce processus de morphogenèse ? Et comment ensuite les combiner pour un hypothétique calcul ?

Le recours aux principes formels intermédiaires (de type ingénierie) n'est acceptable pour Rashevsky que parce qu'il peut les faire reposer sur un principe plus général de la « conception » ou « configuration optimale » [*optimal design*]. C'est pour cela qu'il se résout à introduire entre 1944 et 1948 ce troisième niveau de formalisation mathématique. Ce principe des principes, si l'on veut, est ici décisif en ce qu'il incarne le choix de fonder ce degré intermédiaire de formalisation non plus sur des emprunts mathématiques à la physique mathématique classique mais sur des emprunts formels à la physique appliquée et aux sciences de l'ingénieur. La notion biologique de « fonction » est ce qui lui sert de prétexte à l'introduction purement intuitive du concept d'optimum. Ne pouvant se représenter d'où *vient* la formule mathématique descriptive correspondant à l'expérience, le biologiste théoricien a encore la ressource de se représenter où elle *va*. Et Rashevsky décide que ce recours est légitime. La conceptualisation de la représentation mathématique ne ressortit plus ici à une construction à partir des éléments mais à une conception à partir de la finalité : « quelle relation faut-il pour que cette fonction soit assurée de façon optimale ? » est la nouvelle question que doit se poser le théoricien. Or, c'est la même question que celle que se pose le concepteur ou l'ingénieur devant son cahier des charges.

La conséquence de cette ouverture aux sciences appliquées est la renonciation momentanée à la fondation sur le réel du propos formel. La représentation mathématique n'est plus *construite* de manière supposée analogue aux phénomènes qu'elle représente, elle est *appelée* par la fonction qu'ils doivent remplir. Elle se conçoit à partir de sa fin, donc ici de sa finalité biologique. Des concepts contemporains, produits dans de tout autres contextes, comme celui de « canalisation du développement » ou de « créode », vont être utilisés pour confirmer un temps cette formalisation par le haut.

Mais David Cohn a bien vu que pour que cette formalisation par le haut ne dérive pas de nouveau vers des considérations trop abstraites, trop générales, trop peu testables par l'expérience, il fallait poursuivre le rapprochement vers la pratique de l'ingénieur en l'étendant du transfert ponctuel de formalismes que proposait Rashevsky à un transfert de toute la méthodologie de conception d'un « système » fonctionnel. Mais pour cela, il suffisait selon lui, dans un premier temps, de « disséquer » fonctionnellement la morphogenèse globale en différentes morphogenèses particulières et à visée chaque fois optimale, pour, dans un second temps, en reconstituer le système. Mais Cohn fait ici l'hypothèse implicite lourde que l'on a toujours ce faisant le moyen de recombiner ces fonctions formalisées. Or, ce sont ici les fonctions qui ont pris le rôle qu'avaient les éléments idéalisés dans la biophysique de Rashevsky. Le problème de la combinabilité est-il pour autant résolu ? Ne l'a-t-on pas seulement déplacé ? Suffit-il de se donner

un bon système (à identification hydraulique ou électrique patente comme c'est le cas de la ramification vasculaire[1]) qui réussit à cette méthode pour en avoir montré toute la généralité ?

Bilan général de la première époque

Le bilan général que l'on peut tirer, à l'issue de cette première époque, est donc que la biologie théorique des formes a tâché de pallier l'incapacité des mathématiques statistiques à décrire et à expliquer l'ontogenèse dans son hétérogénéité. Mais les modèles statistiques se sont pourtant considérablement développés entre-temps, à la faveur des problématiques opérationnelles et des entreprises de rationalisation de l'agronomie autour de l'exemple anglo-saxon des stations expérimentales. À travers la diffusion de la méthode des plans d'expérience, telle qu'elle est publiée et enseignée dès la fin des années 1920, la méthode des modèles se diffuse en effet considérablement. Et sa reprise par le physiologiste et généticien Teissier en atteste, si besoin était. Cette partie de la biophysique intéressée à la morphogenèse, de son côté, a travaillé à résister à cette hégémonie. Elle a d'abord refusé l'insertion du hasard dans les formalisations. Elle a ensuite voulu nier la nécessité de la méthodologie fictionnaliste des modèles. Mais cette résistance n'a pas eu gain de cause. On l'a même vu reculer sur bien des points. Pour trouver quelques validations du côté de l'expérience, elle a dû faire des concessions de nature épistémologique. En ce qui concerne la morphogenèse, la biophysique s'est ainsi tardivement orientée vers des formalisations intermédiaires localement finalistes et inspirées des sciences de l'ingénieur. Elle a donc dû assumer, elle aussi, une forme de déracinement. Car cette réorientation se faisait au profit d'une dépendance nouvelle de ces *théories sur les structures* à l'égard de *suppositions sur les fonctions*. Et même si ces suppositions ne devaient relever que du bon sens pour Rashevsky, on n'était pas si loin de pouvoir les considérer aussi comme des fictions commodes.

Nous verrons dans la suite de notre étude qu'à partir de 1954, Rashevsky a une fois encore infléchi son épistémologie. Un certain nombre d'événements sont intervenus à cette époque en effet : la confirmation du modèle de Watson et Crick pour la molécule d'ADN (1953), mais aussi et surtout l'émergence de l'ordinateur dans la biologie et les sciences biomédicales. Pour les biologistes théoriciens, la mise à disposition des ordinateurs a d'abord nécessité pour eux une révision en profondeur de ce que signifiait un système formel et une théorie. Les options épistémologiques en ont été encore davantage modifiées. Mais cela a demandé aux biologistes, non versés en ces matières de par leur formation, une période d'observation et d'assimilation. Ainsi, les premiers usages du calculateur numérique pour représenter des formes et notamment des formes ramifiées ont été plutôt le fait de mathématiciens et de physiciens et non de biologistes. Et nous pouvons d'ores et déjà comprendre pourquoi : aux yeux des biologistes théoriciens intéressés par la forme des vivants comme l'était Rashevsky, le calculateur numérique ne pouvait ne représenter d'abord qu'une grosse machine à calculer. À ce titre, elle pouvait sembler n'être une avancée que pour la biométrie ou la biologie quantitative, c'est-à-dire pour la biologie expérimentale, car, à des fins de test, cette dernière a toujours besoin de traiter au préalable ses données afin de les rendre homogènes aux suggestions théoriques bio-mathématiques.

[1] Rappelons en effet que, dans cette perspective-là, on peut toujours raisonner sur les résistances au flux (sanguin ou de sève) et que ces résistances peuvent s'additionner analytiquement pour former l'équivalent mathématique du système résistif global.

Finalement donc, la période qui s'achève ici a vu naître les premières tentatives de déracinement et de « transversalisation » des formalismes dans l'élément même du langage mathématique. Les mathématiques ne se voient plus reconnaître qu'un statut purement descriptif ou dialectique. Elles servent à travailler notre information sur le monde ; mais elles ne servent plus à représenter le monde directement. La co-naturalité entre les mathématiques et le monde est désormais fortement contestée, surtout dans des contextes pragmatiques ou prime la nécessité d'analyser l'expérience biologique dans sa complexité. Face à ce déracinement se dresse pourtant une série de résistances invoquant la légitimité qu'il y a à persévérer dans l'entreprise de théorisation mathématique, en particulier dans les problèmes de morphogenèse où la modélisation statistique rencontre une forte hétérogénéité interne et peine à rendre compte d'un scénario de croissance à l'échelle de l'individu. Cette résistance que l'on pourrait dire « pythagoricienne » (bien qu'en elle une inspiration « aristotélicienne » se fasse également jour et la renouvelle de par le tournant logiciste des mathématiques qui lui sont contemporaines) est en grande partie ancrée dans une vision de la mathématisation héritée de la physique mathématique du 19ème siècle. Entre-temps, cependant, la physique elle-même a évolué, avec le statut de ses formalisations comme avec ses instruments de calcul. Si cette évolution de la physique, propre au tournant des 19ème et 20ème siècles, ne fut donc pas toujours immédiatement relayée par la biologie mathématique entre les années 1920 et 1950, l'émergence de l'ordinateur fut en revanche l'occasion de bousculer bien des options plus ou moins figées car, avec lui, la méthode des modèles devait prendre une ampleur sans précédent et menacer bien autrement les chantres de la formalisation théorique et spéculative. Comment se mirent en place ces réévaluations ? Comment l'arrivée de l'ordinateur contribua-t-elle à la réorganisation du champ de la formalisation de la forme des plantes ? Telles seront les questions qui nous préoccuperont désormais.

DEUXIEME EPOQUE : LA DISPERSION

INTRODUCTION : La reconnaissance de la « méthode des modèles »

Les travaux des historiens des sciences, comme ceux de Sharon E. Kingsland, Jean-Paul Deléage et Giorgio Israel[1], ont bien montré que la notion de « modèle mathématique » en biologie se répand surtout, au cours des années 1920 et 1930, dans le secteur de l'écologie mathématique naissante[2]. Dans ce contexte, il s'agit d'une approche mathématique de problèmes qui se posent aux sciences de la vie à un niveau nettement populationnel. Dès lors, à cette échelle écologique, les individus sont relativement indifférenciés. On conçoit donc que ce type de modèles mathématiques, valant à l'échelle des populations, n'ait pas d'abord directement incité au développement de la « modélisation mathématique » des phénomènes intervenant au niveau de l'organisme individuel. Si l'on constate bien une inflation de l'expression « modèle mathématique » dans toutes les branches de la biologie après 1945, il serait ainsi faux d'en conclure à une simple extension de l'approche de l'écologie mathématique aux autres secteurs de la biologie. Il faut plutôt voir là la marque de l'influence considérable qu'ont pu avoir d'une part le développement des techniques pragmatiques de recherche opérationnelle[3] et d'analyse des systèmes pendant la guerre[4] et, d'autre part, l'émergence, conjointe mais distincte toutefois, de la cybernétique, notamment à partir des suggestions du physicien et mathématicien Norbert Wiener (1894-1964). Si la cybernétique a des racines elles-même complexes et amplement étudiées par ailleurs[5], on a moins remarqué que c'est essentiellement elle qui a beaucoup fait pour populariser la notion proprement dite de « modèle mathématique » dans tous les secteurs de la biologie, notamment en physiologie et en neurophysiologie bien sûr, mais aussi, quoique plus indirectement, dans les approches théoriques de la morphogenèse de l'individu.

À tel point qu'il nous paraît légitime de parler d'une seconde naissance ou d'un second lieu de naissance pour la modélisation mathématique dans l'histoire des formalisations de la morphogenèse : la cybernétique. Non que la cybernétique ait véritablement fourni dès cette époque des scénarios formels permettant d'expliquer de façon acceptable la morphogenèse ; mais le recours conscient à autre chose qu'à une théorie, à quelque chose qui s'apparente à un construit substitutif d'ingénieur, du type d'une maquette, s'autorise bien de la suggestion de traiter conjointement et de la même manière tout type de contrôles, quel que soit le substrat physique qui

---

[1] [Kingsland, S. E., 1985, 1995], [Deléage, J.-P., 1991, 1994] et [Israel, G., 1996].

[2] Dès 1924, dans ses travaux sur l'évolution irréversible des agrégats, Lotka s'était ainsi explicitement servi d'un « modèle » probabiliste comme illustration simplifiante d'une situation complexe. Il reprenait en fait le « modèle d'urne » à la mécanique statistique et, plus précisément, aux *Leçons sur la théorie des gaz* de Boltzmann. Cet emprunt était lui-même justifié par le fait qu'il concevait sa « Mécanique générale de l'évolution » comme se présentant sous la forme d'une « Mécanique statistique de systèmes d'organismes », [Lotka, 1927, 1956], p. 358. On peut donc trouver là un des liens les plus précoces entre la notion de « modèle » au sens de la mécanique statistique et celle qui se développera dans le secteur de la dynamique des populations. Voir [Lotka, 1927, 1956], pp. 30-31. À la page 360 du même ouvrage, pour résoudre des équations non traitables de manière analytique, Lotka en appelle même à l'usage de « modèles qui marchent » [« *working models* »] et qui se caractériseraient par le fait qu'ils imiteraient la lutte entre les espèces biologiques [« *the biological warfare* »] comme les jeux de guerre imitent les conflits armés entre nations.

[3] Avec cette nuance que la recherche opérationnelle s'est en fait beaucoup fondée sur la modélisation probabiliste, ce qui n'a pas peu fait pour l'expansion corrélative du « modèle statistique ». Mais, il est vrai qu'avec elle, le modèle statistique, comme le modèle formel de la cybernétique d'ailleurs, devient franchement synthétique et comparable en cela à une maquette et non plus nécessairement à un outil d'analyse de données.

[4] Nous partageons pleinement sur ce point le diagnostic de l'historienne des sciences et épistémologue Amy Dahan *in* [Dahan, A., 2003], p. 26. Voir également l'historique de la recherche opérationnelle publié par Florence N. Trefethen *in* [Closkey, J.F.Mc et Trefethen, F.N., 1954, 1957], pp. 7-20.

[5] Sur le rôle des conférences Macy, voir en particulier [Dupuy, J.-P., 1994, 1999], *in extenso*, et [Segal, J., 2003], pp. 143-235.

l'incarne, tant au niveau des systèmes artificiels qu'au niveau des systèmes naturels ou même formels. L'habituel recours au modèle matériel au titre d'une maquette pour le calcul ou l'expérience vient donc s'augmenter là d'un recours, considéré comme étant *de même valeur épistémique*, au « modèle formel ».

Le caractère secondaire de cette distinction (modèle matériel / modèle formel) à l'intérieur d'une conception du modèle par ailleurs clairement unitaire, ce qui en fait la nouveauté épistémologique dans cet après-guerre, apparaît pour la première fois de manière très explicite dans un texte de la revue *Philosophy of Science* publié et co-signé par le physiologiste mexicain Arturo Rosenblueth (1900-1970) et par le mathématicien américain Norbert Wiener (1894-1964) en 1945. Cette unification en même temps que cette distinction sont cruciales dans le développement de l'esprit de la modélisation à l'époque si l'on songe qu'elles seront reprises souvent, et quasiment telles quelles, après adaptation il est vrai, par nombre de cybernéticiens d'abord, de médecins et de biologistes ensuite[1]. Rappelons donc ici rapidement en quoi cette unification et cette distinction doivent consister, selon ces deux fondateurs de la cybernétique. Nous serons alors mieux à même de saisir dans quel contexte général ou peut-être même à l'encontre de quelles propositions de modélisation, la simulation numérique prendra pour sa part son envol quelques années plus tard en recourant à une machine nouvelle, le *computer*.

Toute la thèse de Rosenblueth et Wiener repose d'abord sur une définition assez peu commune de l'abstraction[2] : « L'abstraction consiste dans le fait de remplacer la partie de l'univers que l'on considère par un modèle de structure similaire mais plus simple »[3]. À ce titre, selon eux, la science ne fait que manipuler des « abstractions » de ce genre dans le but soit de « comprendre », soit de « contrôler » les phénomènes qu'elle étudie. Ils poursuivent immédiatement : « Les modèles, formels ou intellectuels d'une part, matériels de l'autre, sont ainsi une nécessité centrale pour la procédure scientifique. »[4] Le terme de « modèle », on le voit, sert donc ici à désigner *indifféremment* une représentation mentale ou un objet matériellement existant. Ce terme sert en fait d'abord à montrer cette idée, chère à Wiener, et qu'il hérite de Mach *via* Karl Pearson et sa *Grammaire de la science*[5], selon laquelle il n'y a pas de rupture de continuité entre la compréhension et le contrôle, entre la théorisation du monde et sa pratique.

Moyennant cette hypothèse, et c'est cela qu'il faut mettre en lumière pour notre propos, l'article de Rosenblueth et Wiener tend à disqualifier tout à fait l'idée de théorie : *dans la science, il n'y a plus que des modèles plus ou moins abstraits*. Or, cela est une thèse plus radicale encore que celle de Boltzmann (1902)[6]. Boltzmann admettait encore qu'il existe des théories sous forme de formulations très générales et abstraites. Il ne les identifiait pas tout à fait à des modèles mais à des analogies symboliques. La seule chose qu'il imposait toutefois, et là était le cœur de sa philosophie modéliste, c'était que l'on recourt toujours à des modèles ou à des images pour *comprendre la théorie*. Pour Rosenblueth et Wiener, l'idée de théorie générale n'a même plus de sens.

---

[1] Voir la distinction entre « modèles physiques » et « modèles dialectiques » en France à partir de [Couffignal, L., 1953], sa reprise explicite chez le médecin Jacques Sauvan *in* [Sauvan, UJ., 1966] puis chez le biologiste et biométricien Jean-Marie Legay *in* [Legay, J.-M., 1973a].

[2] L'épistémologie des modèles telle qu'elle se fait jour dans les travaux de Rosenblueth et Wiener a été analysée plus au long par Jean-Pierre Dupuy. Voir [Dupuy, J. P., 1994, 1999], pp. 34-39.

[3] "Abstraction consists in replacing the part of the universe under consideration by a model of similar but simpler structure", [Rosenblueth, A. et Wiener, N., 1945], p. 316.

[4] "Models, formal or intellectual on the one hand, or material on the other, are thus a central necessity of scientific procedure", [Rosenblueth, A. et Wiener, N., 1945], p. 316.

[5] Sur ce point, voir [Segal, J., 2003], pp. 162-166.

[6] Voir notre annexe A.

Or, c'est là sans doute que l'on peut sentir un des impacts de l'esprit du temps d'après-guerre dans la méthode de la science[1]. Le « théoricien » existe bien encore pour nos auteurs. Mais il est celui qui, n'étant qu'aux prises avec des « modèles formels », travaille seulement à les réduire les uns aux autres, à les élever ou à les abaisser dans leur degré d'abstraction, c'est-à-dire dans leur degré de simplification. Le théoricien ne contemple donc aucune réalité ultime dont il s'agirait de donner une image ou une formule synthétique. Au contraire, puisqu'il faut désormais renoncer à l'idée qu'il puisse exister un « modèle » abstrait unique et totalisant, dès lors qu'il est entendu que l'univers est doté d'une « complexité » qui dépassera à tout jamais la faculté de compréhension finie de l'esprit humain[2], il ne peut jouer que sur le degré de simplification du modèle. Le général n'a plus de valeur en soi. L'idéal, le fondamental, n'est plus le simple. Au contraire. Un modèle abstrait devient une « structure théorique »[3], c'est-à-dire dispose d'une valeur scientifique incontestable, quand il se *concrétise* c'est-à-dire lorsque l'on y ajoute les conditions particulières et complexes dans lesquelles le phénomène s'exprime. Les modèles abstraits sont donc forcément inexacts alors que l'idéal devient le concret. Le formel est un pis-aller. Il n'est qu'idéel. Il n'est pas le fond idéal du réel. Toute trace de pythagorisme est ici bannie. Selon Rosenblueth et Wiener, l'histoire de la science fonctionne donc selon un processus de concrétisation de ses modèles formels. Ils deviennent progressivement des « structures théoriques » fiables[4].

Un grand nombre de scientifiques, dont von Neumann et surtout Turing, vont de près ou de loin souscrire à ce nouveau cahier des charges que la cybernétique fixe à la science[5]. La « modélisation mathématique » assumée comme non réaliste, partielle et simplificatrice va en effet de plus en plus devenir une procédure que l'on revendique en tant que telle et dont on ne craindra pas qu'elle soit fustigée. Comme nous allons le voir, Alan Turing a été l'un des premiers à employer ce vocable dans le contexte d'un travail théorique sur la morphogenèse. Ce travail sera doublement instructif pour nous dans la mesure où il y prône également le recours au tout récent *computer*. C'est bien également cet article qui le premier évoque une des nouvelles possibilités que l'ordinateur pourrait conférer à une formalisation de la morphogenèse. Tâchons maintenant d'en saisir le sens et la portée dans le cadre de notre question sur les rapports entre l'ordinateur et l'histoire des formalisations récentes de la morphogenèse. Nous verrons ensuite que Turing est loin d'avoir été le seul à faire un usage précoce de l'ordinateur pour des problèmes de formalisation et de calcul (les deux étant alors liés) de la morphogenèse.

---

[1] Les sociologues Philippe Breton et Serge Proulx ont particulièrement confirmé, chez Norbert Wiener, la présence d'une telle tendance désabusée face à la faillite tant politique que scientifique des grandes solutions théoriques générales. Voir [Breton, P. et Proulx, S., 1989], pp. 209-222.

[2] C'est le terme même employé par [Rosenblueth, A. et Wiener, N., 1945], p. 320. On reconnaît là l'argument propre aux positivismes depuis Auguste Comte. Alors qu'Auguste Comte en tirait l'idée qu'il ne fallait plus parler de « causes » mais seulement de « lois », le néo-positivisme de la cybernétique en tire la conséquence plus pessimiste encore qu'il n'y a même plus de « lois » et qu'il ne faut chercher que des « modèles », ces derniers incarnant un compromis, jamais idéal donc, entre l'applicabilité (modèle concret) et la généralité (modèle abstrait).

[3] [Rosenblueth, A. et Wiener, N., 1945], p. 319.

[4] [Rosenblueth, A. et Wiener, N., 1945], p. 319.

[5] Amy Dahan rappelle ainsi que, selon von Neumann (*in* « *Methods in the Physical Sciences* », Works, VI, p. 491), « les sciences n'essaient pas d'expliquer, elles ne font que construire des modèles dont la seule justification est de fonctionner », [Dahan-Dalmedico, A., 2003],p. 26.

CHAPITRE 8 – L'ordinateur comme calculateur numérique : le modèle mathématique de Turing (1952)

C'est l'un des co-fondateurs de l'informatique moderne, Alan Turing (1912-1954)[1], qui, le premier, poussa en effet les informaticiens à se pencher sur les questions de morphogenèse. Mais, ce faisant, il incita également les biologistes à recourir au calculateur numérique pour le traitement de modèles mathématiques de morphogenèse. Sa proposition d'un modèle de morphogenèse fondé sur des diffusions et des réactions a été publiée en 1952 dans les *Philosophical Transactions of the Royal Society*[2].

Il existe déjà un assez grand nombre de travaux sur la pensée, la vie et les travaux d'Alan Mathison Turing[3]. Comme cela serait peu utile d'y revenir pour notre problématique, nous ne nous attarderons donc pas sur l'éventail de sa production scientifique. Seul un aspect particulier de son œuvre doit nous arrêter. Lors des années qui ont précédé son suicide, en 1954, Turing a effectué un certain nombre de travaux inchoatifs sur le phénomène de la phyllotaxie spirale qu'il tâchait d'expliquer à travers un modèle séminal et déjà publié en 1952. Mais ces derniers travaux n'ont eu que très récemment un véritable écho dans la communauté scientifique puisqu'ils n'ont pour leur part été publiés qu'en 1992[4]. Nous nous en tiendrons donc ici au travail effectivement publié en 1952 .

Une nouvelle machine à calculer pour un modèle de morphogenèse

Le philosophe des sciences Jean Lassègue a déjà très clairement rendu compte des principales options conceptuelles que manifeste l'article de 1952[5]. Et il les a ensuite contextualisées à travers une analyse psychologique du personnage à la fois troublante et assez convaincante[6]. Pour notre part, notre perspective visant à rendre compte du fait que les concepts ont une histoire non seulement dans la vie psychologique de l'individu mais aussi dans la vie sociale et historique de la communauté, en l'espèce scientifique, à laquelle cet individu appartient, nous nous pencherons de nouveau sur cet article en lui posant un ensemble de questions différemment orientées, dont celles-ci : par rapport aux représentations mathématiques antérieures de la morphogenèse déjà évoquées, qu'est-ce qu'apporte la solution technique des ondes chimiques stationnaires ? Quel rôle les théories chimiques de l'embryogenèse, alors naissantes, y ont-elle joué ? Dans ce cadre-là, quelle importance Turing donne-t-il au calculateur numérique ? Enfin, peut-on réellement dire que ce travail fonde les méthodes de simulations informatiques ?

Jean Lassègue a rappelé que c'est dans le but final de concevoir un cerveau artificiel que Turing s'est finalement penché sur le substrat biologique. Jusque là, en effet, Turing s'était

---

[1] Pour une présentation générale des travaux de Turing, voir [Ramunni, G, 1989], pp. 78-85.
[2] [Turing, A. M., 1952].
[3] Voir [Lassègue, J., 1998b] et [Lassègue, J., 1998a] qui s'appuient notamment, pour les points de biographie, sur le livre de Andrew Hodges paru à Londres en 1983 : *Alan Turing : The Enigma of Intelligence.* Voir sa traduction partielle *in* [Hodges, A., 1983, 1988]. Voir également [Rammuni, G, 1989] et la présentation de Girard dans [Turing, A. et Girard, J.-Y., 1995]. Sur les questions de morphogenèse dans les derniers travaux de Turing, la meilleure source est le site internet de J. Swinton [Swinton, J., 2003]. Il contient des archives inédites.
[4] Par P. T. Saunders dans l'ouvrage *Collected Works of A. M. Turing : Morphogenesis*, New York, North Holland, 1992, 132p.
[5] [Lassègue, J., 1998b], pp. 124-143.
[6] [Lassègue, J., 1998b], pp. 191-197.

distingué dans des travaux formels détachés de tout rapport à une incarnation physique. Selon lui, il fallait en fait « réduire la tension entre un point de vue indépendant de tout substrat (nécessaire pour rendre possible le transfert aux ordinateurs de propriétés liées à la pensée) et un point de vue dépendant d'un substrat particulier, le substrat biologique (nécessaire pour rendre compte des phénomènes auto-organisés) »[1]. Nous ajouterions qu'en toute logique, un travail spécifique sur la faculté d'auto-organisation du substrat biologique entraînait pour sa part une véritable recherche formelle sur la mise en formes concrètes des vivants. C'est donc probablement la raison pour laquelle Turing s'est orienté vers la modélisation de la naissance et du développement des formes dans le substrat biologique. Mais cela n'explique pas pourquoi il a eu recours à une approche préférentiellement chimique plutôt que mécanique ou électrique[2]. Selon nous, il faut pour le comprendre se pencher notamment sur les indices qui, dans l'article de Turing, indiquent les travaux antérieurs sur lesquels il fait fond.

Cette interrogation est évidemment cruciale car, comme nous le verrons, on ne peut répondre correctement à la question de savoir quel rôle Turing donnait effectivement au modèle mathématique dans la morphogenèse du vivant, et spécifiquement à son traitement à l'aide du calculateur numérique, sans avoir auparavant tenté de contextualiser d'un point de vue d'histoire des sciences cette modélisation chimico-mathématique, tant il est vrai que le rôle épistémologique que l'on donne au calculateur numérique dépend pour tout scientifique (surtout lorsqu'il s'agit d'une première incursion dans le domaine des sciences de la nature comme c'est le cas ici pour Turing) d'une ontologie spécifique à la fois à son objet d'étude et à la manière dont il décide de se le représenter à un moment donné de son travail.

Le modèle chimico-mathématique

Rappelons donc brièvement en quoi consiste le propos central de Turing. Il s'agit de rendre compte de façon très simplifiée d'apparition de formes dans un substrat biologique homogène par la naissance de ruptures de symétrie entre les phénomènes de diffusion et de réactions chimiques. Les substances qui diffusent et réagissent se voient qualifier du néologisme de « morphogènes » par apparentement aux gènes qui détermineraient la production des formes. Ainsi, dans le but de formaliser la mise en place d'un milieu auto-organisé, Turing s'appuie sur l'évolution temporelle des systèmes de réaction-diffusion au niveau des seules substances chimiques. D'une part, les équations de diffusion contrôlent les flux de substances entre les cellules ou entre les points géométriques du substrat (selon que l'on représente le substrat de façon discrète ou continue). Elles suivent les lois ordinaires de la diffusion, c'est-à-dire des lois mathématiques avec des équations aux dérivés partielles : « c'est très semblable à la conductivité de la chaleur, la diffusibilité prenant la place de la conductivité. »[3] D'autre part, les équations des réactions chimiques contrôlent les taux de réactions en fonction des concentrations des substances. Elles s'expriment alors selon le modèle de la loi d'action de masse[4]. Cependant Turing simplifie considérablement le modèle de sorte qu'il demeure linéaire (voir encadré).

[1] [Lassègue, J., 1998b], p. 96.
[2] [Lassègue, J., 1998b], p. 126.
[3] "This is very like the conduction of heat, diffusibility taking the place of conductivity", [Turing, A. M., 1952], p. 40.
[4] Qui n'est pourtant valable que dans une solution parfaite.

Le formalisme du modèle chimico-mathématique

Il est possible de représenter le modèle de Turing de façon simplifiée[1]. Si les variables x et y représentent les concentrations d'une cellule donnée en morphogène X et en morphogène Y, un système d'équations différentielles couplées peut représenter leur évolution du point de vue des réactions chimiques qui les affectent :

$$x' = 5x - 6y + 1$$
$$y' = 6x - 7y + 1$$

Ces valeurs de paramètres prises à titre d'illustration signifient que chaque morphogène est inhibiteur de l'autre, mais que chacun est activateur de lui-même de par l'effet d'une auto-catalyse. Turing considère ensuite une cellule voisine vers laquelle x1 et y1 de la cellule 1 diffusent avec des constantes de diffusion d1 et d2. On définit de même x2, y2, pour la cellule 2. En combinant les phénomènes de diffusion et les phénomènes de réaction, on a donc le système total suivant :

$$x1' = (5x1 - 6y1 + 1) + d1\ (x2-x1)$$
$$y1' = (6x1 - 7y1 + 1) + d2\ (y2-y1)$$
$$x2' = (5x2 - 6y2 + 1) + d1\ (x1-x2)$$
$$y2' = (6x2 - 7y2 + 1) + d2\ (y1-y2)$$

Si l'on recherche un point d'équilibre, les dérivées s'annulent et on voit immédiatement que le système de valeurs x1=y1=x2=y2=1, par exemple, est solution. Or Turing fait observer que cet état d'équilibre est instable pour certains couples (d1, d2) bien choisis. Car si l'on part de petites fluctuations par rapport à cet équilibre, la cellule 1 va contenir toujours plus de X et de Y aux dépens de la cellule 2.

Turing suggère ainsi les valeurs suivantes : $x1(t=0) = 1{,}06$ $y1(t=0) = 1{,}02$
$x2(t=0) = 0{,}94$ $y2(t=0) = 0{,}98$
$d1 = 0{,}5$ $d2 = 4{,}5$

Dans ce cas, on trouve x1' = 0,12 ; y1' = 0,04 ; x2' = -0,12 ; y2' = -0,04. Donc l'écart va se creuser jusqu'à ce que la cellule 2 soit vide et que x1 = y1 =2 et x2 = y2 = 0. Ainsi de petites fluctuations peuvent susciter une baisse de symétrie, donc une forme, à l'intérieur d'un substrat au départ symétrique.

Moyennant ces représentations formelles élémentaires, l'évolution globale du modèle mathématique prouve que des ruptures de symétries spatiales peuvent apparaître spontanément, sous l'effet de petites perturbations. Ces ruptures de symétrie sont dues à des effets d'ondes stationnaires ou, si l'on préfère, d'interférences constructives. Ainsi des formes dissymétriques peuvent naître et se stabiliser dans un milieu au départ homogène. Ce résultat lui paraît important dans la mesure où il contraste manifestement avec les considérations de l'ouvrage de d'Arcy Thompson qu'il cite et dont il semble avoir une bonne connaissance. Dans *On Growth and Form* en effet, on trouve un paragraphe sur l'explication des formes au moyen de modèles de diffusion. Or, ce que d'Arcy Thompson montre au sujet de ces modèles, c'est qu'ils peuvent certes contribuer à l'instauration de formes, mais toujours au bénéfice d'une forte symétrie finale[2]. Même

[1] Nous nous appuyons pour ce faire sur [Rosen, R., 1968], p. 494.

[2] Voir [Thompson, d'Arcy (Sir), 1917, 1961, 1994], pp. 124 : « Qu'au départ le liquide soit en mouvement ou au repos, le système atteint toujours un état symétrique ou uniforme […] Dans l'état d'équilibre final, les cellules sont toutes des hexagones de dimension bien précises, déterminées par la température, la nature et l'épaisseur de la couche liquide ; le

les petites « fluctuations au hasard », qui sont par exemple à l'origine de la structure cellulaire des tourbillons de Bénard[1], participent à l'uniformisation du système en le faisant dériver finalement vers une forme stable et symétrique. Selon nous, il est très probable que Turing ait médité ce passage de d'Arcy Thompson et qu'il ait été notamment intrigué par le fait que des « petites fluctuations au hasard » conduisent toujours à des systèmes fortement symétriques. Il est même très vraisemblable selon nous que le fait que d'Arcy Thompson ait particulièrement insisté sur le rôle central des « forces moléculaires » dans cette symétrisation forcée, par-delà les fluctuations de hasard, ait donné l'idée à Turing d'*introduire*, *aux côtés des effets de diffusion*, des *effets chimiques afin de* contrebalancer cette régression mécanique vers la symétrie. Quant à la convection proprement dite, elle sera tout bonnement évacuée par Turing pour des raisons de faible pertinence biologique[2].

L'influence de l'embryologie chimique

Il faut remarquer que Turing met en évidence son phénomène en faisant des calculs à la main (donc il ne met pas d'emblée l'usage de l'ordinateur en avant) sur des équations très simplifiées et calculables du fait même de la simplicité extrême des formes des tissus organiques (tore ou cylindre) dont il suppose qu'ils sont le siège de ces phénomènes de réaction-diffusion. De plus, toujours afin de pouvoir faire ces calculs à la main, il suppose que « les taux de réactions sont des fonctions linéaires des concentrations, une hypothèse qui est justifiable dans le cas d'un système qui vient juste de quitter une condition homogène »[3]. Son modèle général repose donc sur un système d'équations différentielles linéaires.

Beaucoup de choses ont été dites sur ce modèle mathématique de la morphogenèse. Au lieu de nous représenter cette suggestion seulement comme un météore scientifique, qualificatif qui, avouons-le, lui convient assez bien tout de même compte tenu du fait que, d'une part, Turing n'était pas un embryologiste et que, d'autre part, cette suggestion a été féconde sur le tard mais de façon très remarquable[4], nous souhaiterions le situer ici dans un contexte d'histoire des sciences et des concepts afin de le penser en rapport avec notre problématique des représentations mathématisées de la forme depuis l'ordinateur.

Or, nous avons vu précédemment comment Rashevsky avait, dès 1933, proposé une « théorie » (morte-née) de la multiplication cellulaire sous l'effet de forces électriques, puis, en 1938, une « théorie », mieux vérifiée, de cette même multiplication sous l'effet de forces mécaniques de diffusion. Il est bien sûr probable que Turing n'en ait pas eu connaissance.

---

jeu des forces moléculaires n'impose pas seulement l'établissement d'un réseau cellulaire de forme précise, mais il confère également une 'taille fixe' à la cellule. »

[1] Courants de convection qui s'instaurent dans une fine couche de liquide légèrement chauffée à la base et entrant en compétition avec la conduction thermique. Ce phénomène a été expliqué en 1900 par le physicien H. Bénard. Au contraire de d'Arcy Thompson, [Nicolis, G. et Prigogine, I., 1989, 1992] (pp. 13-18) considèrent que les tourbillons de Bénart sont déjà une forme remarquable de rupture de symétrie et donc une forme de « complexité ». En fait, même avec l'instauration d'un système cellulaire uniforme, il y a bien en effet diminution du nombre de degrés de symétrie affectant le substrat initial.

[2] [Turing, A. M., 1952], p. 38.

[3] "The wave theory which has been developed here depends essentially on the assumption that the reaction rates are linear functions of the concentrations, an assumption which is justifiable in the case of a system just beginning to leave a homogeneous condition", [Turing, A. M., 1952], p. 71.

[4] Voir [Kepper (de), P., Dulos, E., Wit (de), A., Dewel, G. et Borckmans, P., 1998], p. 84. Voir également les travaux du biomathématicien de l'Université de Washington, James D. Murray (1989), présentés par [Chauvet, G., 1995], pp. 157-163. Dans les années 1980, J. D. Murray montrera qu'avec des modèles chimiques de réaction-diffusion, on peut reproduire visuellement des zébrures ou des tâches semblables à celles que l'on trouve sur le pelage de certains animaux.

Il est une chose que l'on peut dire toutefois au vu des hypothèses de son modèle et de sa bibliographie : sa mathématisation de la morphogenèse lui est clairement inspirée dans un contexte intellectuel où il a plutôt connaissance des travaux récents de l'embryologie chimique que de ceux de la biophysique rashevskyenne qui n'a pourtant jamais cessé de s'interroger sur la forme des êtres vivants. Il cite ainsi un livre de l'embryologiste anglais C. M. Child (1869-1954), l'introducteur de la notion de gradient en embryologie (1916), de même que l'ouvrage déjà classique de C. H. Waddington, *Organisers and genes*, remontant à 1940[1]. On sait, par ailleurs qu'au début de ses recherches sur la morphogenèse, Turing, alors en poste à Manchester, a été en contact avec un collègue botaniste de l'Université de Manchester, C. W. Wardlaw[2]. Or, ce dernier a une prédilection pour la recherche d'une théorie causale et unitaire de la phyllotaxie et de la morphogenèse en général. Pour lui, cette théorie devrait préférentiellement s'exprimer au moyen d'une approche physico-chimique. Après un travail expérimental sur la structure et le fonctionnement du méristème apical, puis sur l'organogenèse de la fougère, Wardlaw s'était en effet appuyé sur les mises en évidence récentes (1933-1935) du rôle des hormones de croissance, appelées auxines, dans la morphogenèse végétale. L'existence de phytohormones était pressentie depuis les années 1880[3] ; mais cette confirmation expérimentale vint à l'époque redonner du lustre aux théories des gradients physiologiques ou chimiques. Au début des années 1950, Wardlaw tient donc en haute estime les travaux de d'Arcy Thompson, de Child, mais aussi ceux, plus anciens, d'Hofmeister. De manière assez cohérente, en ce qui concerne plus particulièrement la phyllotaxie, Wardlaw critique en revanche l'approche dispersante et anti-mathématiste de Plantefol et de l'école française de botanique[4]. On peut donc imaginer que Turing a été introduit dans des problématiques d'embryologie mathématique à partir de points de vue proches de ceux de Wardlaw.

À côté de cette influence certaine, et comme Turing le répète à maintes reprises, il a fortement conscience de se livrer à une « modélisation » entendue au sens d'une extrême simplification des représentations. Or, il se trouve que les hypothèses lourdes qu'il choisit de faire sont finalement toujours en faveur d'une représentation chimique des phénomènes morphogénétiques. Conformément à notre suggestion précédente, on voit là se préciser la stratégie qui est la sienne face au demi-échec que l'approche mécaniste avait manifestement enregistré au travers des propos pourtant enthousiastes de d'Arcy Thompson. Mais c'est essentiellement en s'appuyant sur la notion waddingtonienne d'« évocateur » qu'il rejette finalement toute prise en compte de phénomènes mécaniques. L'argument principal qu'il évoque pour justifier cette abstraction supplémentaire n'est donc pas celui de la plus grande simplicité des calculs :

« Dans cet article, il est proposé de prêter plutôt son attention aux cas dans lesquels l'aspect mécanique peut être ignoré et où l'aspect chimique est le plus significatif. Ces cas promettent d'être plus intéressants, parce qu'il est présumé que l'action caractéristique des gènes eux-mêmes est chimique. Le système qui va être réellement considéré consiste donc en des

[1] [Turing, A. M., 1952], p. 72.
[2] Voir [Hodges, A., 1983, 1988], p. 396. Dans ses écrits, Wardlaw semble même dire qu'il l'aurait rencontré pendant que Turing préparait sa publication de 1952. Voir [Wardlaw, C. W., 1968], p. 12.
[3] Voir l'article de J.-F. Leroy *in* [Taton, R., 1964, 1995], pp. 736-737.
[4] [Wardlaw, C. W., 1968], p. 193.

masses de tissus qui ne croissent pas, mais à l'intérieur desquelles certains substances réagissent chimiquement, et à travers lesquelles elles diffusent. »[1]

C'est donc dans une claire allusion à la théorie des gradients de Child, qu'il cite dans sa bibliographie, et à la découverte du caractère chimique des « évocateurs », appelés plus tard « organisateurs » par Waddington (qu'il a lu), que Turing se décide à faire abstraction des considérations mécaniques[2]. Mais c'est aussi parce que sa lecture de d'Arcy Thompson lui en avait montré les limites. Ce faisant, au niveau conceptuel, il innove en effet sur les théorisations mathématiques existantes, bien qu'il ne semble pas le savoir, notamment par rapport à la solution de Rashevsky, dans la mesure où il se simplifie davantage la tâche : Turing suppose que les tissus existent déjà parce qu'il s'appuie sur une théorie du gradient qui confine en fait à une théorie du champ morphogénétique[3]. La notion de diffusion des « morphogènes » lui vient directement des hypothèses de l'embryologiste Waddington. Son modèle n'est donc pas un modèle de croissance à proprement parler, ni un modèle de multiplication cellulaire, c'est un modèle de traçage de formes [« *patterns* »] dans un substrat biologique déjà existant et déjà réceptif aux morphogènes.

En 1940, Waddington avait développé lui-même cette idée des réactions chimiques qui se couplaient au gré des inhibitions ou des catalyses réciproques et qui finissaient par se « verrouiller » mutuellement, ce qu'il appelait alors des « *interlocked reactions* »[4]. Mais le traitement mathématique lui avait paru inextricable. C'est pourquoi par la suite, et comme nous l'avons signalé plus haut, il tâchera de trouver secours du côté des modèles différentiels de la dynamique des populations d'où il espérera tirer des solutions mathématiques calculables à la main.

Or, c'est précisément à ce niveau là que la connaissance personnelle que Turing a des calculateurs numériques intervient. Turing se satisfait sans remords d'un modèle totalement irréaliste dans son dimensionnement et dans sa linéarité supposée parce qu'il sait par ailleurs que l'on n'est plus par principe condamné à des calculs à la main. Waddington, lui, au contraire, a renoncé au réalisme de descriptions formelles aussi précises que le modèle de réaction-diffusion pour des raisons de calculabilité pratique car il ne perçoit pas immédiatement ni aussi bien que Turing le potentiel des calculateurs numériques[5].

La modélisation mathématique et le rôle du calculateur numérique selon Turing

Quoi qu'il en soit, il ne nous semble pas possible de faire de Turing un promoteur d'une modélisation mathématique dans les sciences du vivant comprise au sens d'une analogie mathématique purement formelle. Puisque le modèle mathématique est une idéalisation du réel, il

---

[1] "In this paper, it is proposed to give attention rather to cases where the mechanical aspects can be ignored and the chemical aspect is the most significant. These cases promise more interest, for the characteristic action of the genes themselves is presumably chemical. The systems actually to be considered consist therefore of masses of tissues which are not growing, but within which certain substances are reacting chemically, and through which they are diffusing", [Turing, A. M., 1952], p. 38.

[2] Wardlaw rappelle que cette insistance, à laquelle il souscrit d'ailleurs lui-même, sur les mécanismes chimiques au détriment des mécanismes remonte à Child. Voir [Wardlaw, C. W., 1968], p. 67.

[3] R. Kehl (in [Taton, R., 1964, 1995], pp. 634-635) rappelle que l'embryologie, pour formaliser les modes opératoires des « inducteurs » puis des « organisateurs », a successivement repris les trois concepts-clés de la physique : le gradient (C. M. Child, 1915), le champ (J. S. Huxley, 1932) et le potentiel. Il commente de façon éclairante pour nous : « La notion de champ est plus générale, car l'action ne se limite pas ici à une direction axiale décroissante, mais irradiée dans toutes les directions à partir d'un centre », *ibid.*, p. 634.

[4] [Waddington, C. H., 1962], p. 46.

[5] De plus Waddington écrivait ce texte en 1940, juste avant la mise au point de ces calculateurs. Alors que Turing écrit en 1952, époque où les gros calculateurs numériques se multiplient dans les universités.

lui reste toujours quelque chose du réel, un lien, même très ténu, et le réel le plus important dans le phénomène de la morphogenèse est, selon ce qui lui apparaît préférentiellement, le réel chimique. C'est donc lui qui doit être le guide pour la formalisation mathématique. De ces remarques, on peut déjà tirer une méthodologie de la modélisation mathématique turingienne : on modélise mathématiquement un phénomène vivant en conservant dans le modèle (sous forme certes idéalisée) les micro-événements apparemment les plus déterminants au regard des connaissances expérimentales limitées mais les plus actuelles d'une époque[1]. De façon significative, Turing précise même qu'une représentation mathématiquement « idéalisée » signifie, en ce sens, une représentation « falsifiée »[2]. Est-ce que pour autant, cela fait de lui le chantre d'une modélisation purement phénoménologique ? Il nous semble sur ce point en léger désaccord avec l'opinion de la cybernétique naissante, par exemple. Ainsi, rappelons que Rosenblueth et Wiener écrivaient en 1945 : « L'abstraction consiste dans le fait de remplacer la partie de l'univers que l'on considère par un modèle de structure similaire mais plus simple.»[3] L'abstraction est donc elle-même définie comme pratique de modélisation. La modélisation est forcément comprise comme *abstraction du détail*, simplification, idéalisation, lissage des singularités, conservation de l'essentiel comme pure forme. Or, l'essentiel pour Turing reste matériel et fait l'objet d'une discipline d'étude séculaire et bien implantée : la chimie. Ainsi, Turing ne se contente pas d'une modélisation phénoménologique et de surface, il éprouve le besoin de supposer des entités (les « morphogènes ») pour *construire* son modèle. Son modèle est donc construit, il n'est pas induit. Il n'est pas même déraciné, au sens où nous l'entendons. Ce n'est pas non plus un modèle purement informationnel au sens des cybernéticiens. C'est pourquoi d'ailleurs Wardlaw s'appuiera par la suite pendant près de 15 ans sur ce qu'il appellera la « théorie de Turing ». Sans réussir à confirmer plus que des tendances, il tentera même de calibrer ce modèle théorique grâce à des confrontations quantitatives avec l'expérience.

C'est que Turing a également pour objectif de sortir les considérations morphogénétiques de leur enfermement théorique. Mais il ne renonce pas à la théorisation formelle en tant que telle. Le calcul numérique a pour lui cette fonction de rendre plus concrètes les hypothèses théoriques de l'embryogenèse, et cela parce que son modèle n'est pas une pure analogie de surface. En ce sens, il lui suffit d'avoir montré non pas un usage systématique du calculateur numérique mais la possibilité de l'extension de son modèle mathématique vers un modèle non-linéaire, cette fois-ci assumé, grâce à la disponibilité nouvelle des calculateurs numériques. Dans sa conclusion, il propose d'introduire à l'avenir une « méthode computationnelle »[4] qui mette en œuvre non plus des théories « embrassant »[5] un processus général, mais des cas particuliers de ce processus. Pourtant, cette approche computationnelle en embryologie chimique ne va pas jusqu'à la représentation des molécules chimiques. De par son chimisme, le modèle, chez lui, reste fermement continuiste même s'il est appliqué sur un substrat discrétisé comme un groupe de cellules. Il faut ainsi distinguer la discrétisation du modèle de la discrétisation du substrat. Turing pense à discrétiser son modèle sans pour autant discrétiser le substrat qui légitime le modèle.

---

[1] Cette interprétation n'est pas incompatible avec la thèse d'une obsession chimiste qui aurait été par ailleurs le propre de Turing (le poison dans la pomme qui a servi à son suicide, les hormones qu'on lui injectait…). Voir [Lassègue, J., 1998b], pp. 191-192.

[2] C'est en ce sens qu'il comprend l'expression de « modèle mathématique », [Turing, A. M., 1952], p. 37.

[3] "Abstraction consists in replacing the part of the universe under consideration by a model of similar but simpler structure. Models, formal or intellectual on the one hand, or material on the other, are thus a central necessity of scientific procedure", [Wiener, N., 1945], p. 316.

[4] "computational method", [Turing, A. M., 1952], p. 72.

[5] [Turing, A. M., 1952], p. 72.

Pour modéliser la croissance et les formes à l'aide de l'ordinateur, Turing n'a donc pas ici l'idée d'une approche générative qui serait centrée sur les histoires individuelles des molécules chimiques[1]. Son projet d'utilisation du calculateur reste donc dans les limites d'un emploi de la machine au titre d'un *calculateur pas à pas* d'un modèle de processus qui sont par ailleurs continus. L'ambivalence au sujet du caractère computationnel ou représentationnel du modèle telle qu'elle existait déjà à la même époque dans les travaux de von Neumann et Ulam sur les simulations numériques de type Monte-Carlo est par conséquent absente de son propos. C'est pourquoi, il serait inexact de le voir comme le père fondateur de la simulation sur ordinateur[2]. Tout au plus a-t-il annoncé un programme, en même temps qu'il a montré les limites de l'approche continuiste classique. Turing précise qu'il « serait possible de traiter quelques cas particuliers avec l'aide de calculateurs numériques »[3]. Il poursuit en justifiant cette position de la façon suivante : « cette méthode a l'avantage de ne pas rendre aussi nécessaires les hypothèses simplificatrices comme c'est le cas lorsque l'on pratique une analyse de type théorique »[4]. L'ordinateur devrait ainsi progressivement servir à seconder l'homme dans des calculs itératifs complexes, qui ainsi ne seraient plus rédhibitoires, et par ce biais il devrait contribuer à modifier la pratique théorique des chercheurs.

Pour finir, prenant acte du fait que les exemples biologiques qu'il a utilisés dans son article étaient simplistes, voire imaginaires, Turing insiste sur l'idée selon laquelle les phénomènes biologiques sont généralement très compliqués et que les mathématiques élémentaires qu'il a employées n'y sont pas adaptées. Il s'agit cette fois-ci d'un appel en direction des artisans de formalismes que sont les mathématiciens et les biologistes théoriciens. Pour Turing, dans le cas précis de la modélisation de la morphogenèse, l'ordinateur garde donc essentiellement sa fonction de calculateur. Par des procédés d'approximation et d'analyse numérique apparentés à la méthode des éléments finis développée en sciences de l'ingénieur, on sait déjà en effet lui faire « résoudre » des équations différentielles complexes sans avoir à simplifier leur formulation explicite, c'est-à-dire sans négliger une partie des termes qui y intervenaient. Pour cela, il suffit de considérer les différentielles comme des rapports entre des valeurs ou « éléments » finis et non plus comme la limite d'un rapport entre des quantités infinitésimales. L'ordinateur apporte donc bien quelque chose de nouveau dans la pratique scientifique, mais seulement au niveau de la puissance de calcul et non directement au niveau conceptuel. Tout au plus libère-t-il l'esprit créatif des théoriciens de la contrainte de la solubilité à la main des équations. Dans cette perspective, l'ordinateur est certes l'occasion d'une réflexion et d'un réajustement important au sujet des formalismes mathématiques en biologie. Ces derniers sont en général trop simples face à des objets « très compliqués »[5].

Réception de l'article de Turing en embryologie

Cet article a par la suite suscité l'intérêt de Wardlaw, bien sûr, comme celui de Conrad Hal Waddington, dont on a vu que certaines idées avaient été initialement à l'origine du modèle de Turing. Waddington reconnaît qu'il s'agit d'une contribution majeure pour la biologie théorique

[1] Il ne s'agit donc pas d'une simulation moléculaire avant l'heure.
[2] Comme le suggère [Lassègue, J., 1998a], p. 76.
[3] "It might be possible, however, to treat a few particular cases in detail with the aid of a digital computer", [Turing, A. M., 1952], p. 72.
[4] "This method has the advantage that it is not so necessary to make simplifying assumptions as it is when doing a more theoretical type of analysis", [Turing, A. M., 1952], p. 72.
[5] "very complicated", [Turing, A. M., 1952], p. 72.

dans la mesure où il y est clairement mis en évidence le fait que toute forme d'apparence régulière peut « émerger d'un système qui consiste au départ seulement en une étendue homogène perturbée par des processus purement aléatoires »[1]. Cependant, Waddington tient à exprimer deux critiques à l'encontre de ce modèle, du point de vue du biologiste qu'il revendique d'être[2].

Tout d'abord, les motifs produits par ce modèle semblent finalement assez irréguliers quand ils ne sont pas, au contraire, brutalement périodiques. Ce qui semble manquer à ce modèle, c'est donc la représentation de la façon dont les motifs se coordonnent en fait entre eux dans la réalité observée pour n'être ni tout à fait irréguliers ni complètement systématiques ou périodiques. Or, précise Waddington, ce à quoi le biologiste penserait en cette occasion, c'est assurément à un processus de « feedback », de contrôle en retour, de certains des motifs déjà imprimés sur ceux qui sont en train de s'imprimer sur le substrat. Si cela ne tenait qu'à lui, le biologiste tendrait donc à réintroduire ici la modélisation formelle d'une téléonomie locale pour la morphogenèse. Ce qui gêne le biologiste, c'est le fait que ce processus de Turing soit aveugle, qu'il soit comme poussé par les mécanismes chimiques sans que le biologique fonctionnel préexistant (puisqu'il y a substrat biologique) n'ait un droit de regard sur cette mise en forme chimique au moment où elle a lieu. À cet égard, ce sont les concepts de la cybernétique qui pourraient amender le modèle, selon Waddington.

Ensuite, Waddington produit une deuxième critique, celle qu'il juge décisive mais non point rédhibitoire. Dans ce modèle de Turing, en effet, les dimensions des structures, comme les longueurs d'onde des motifs périodiques en particulier, dépendent uniquement des constantes chimiques donc du niveau chimique d'explication. Les tailles des motifs sont déterminées dans l'absolu (non relativement aux autres parties de l'organisme) et uniquement par rapport aux constantes chimiques. Au contraire, « dans la plupart des systèmes biologiques […], la longueur d'onde des structures périodiques est liée à la taille totale »[3] de l'organisme. Ce problème est une conséquence cruciale, et tout à fait remarquable, du réductionnisme propre au modèle théorique de Turing (la morphogenèse biologique réduite au chimique). Cela voudrait dire par exemple que les grands spécimens de cœlentérés[4] auraient un plus grand nombre de tentacules que les petits ! Ce qui est manifestement absurde... Même en prenant en considération le côté fictif et simplificateur du modèle de Turing, Waddington ne peut admettre qu'il conduise à une telle rigidité formelle. Cette détermination chimique de la morphogenèse est en ce sens incompatible avec les observations élémentaires que d'Arcy Thompson lui-même a consignées et rapportées dans sa « théorie des transformations ». Le niveau chimique d'explication, même métaphorique, semble tout à fait hors-sujet à cet égard. Et Turing ne s'aperçoit pas qu'en ayant tourné le dos aux explications mécanistes de d'Arcy Thompson à cause de leur incapacité à rendre compte des ruptures de symétrie, il tombe lui-même dans l'écueil de rendre la mise en formes biologiques trop dépendante du niveau chimique de la matière. Voulant échapper à un premier type de réductionnisme, Turing tombe dans un autre, malgré ses précautions oratoires sur le caractère « idéalisé » à l'extrême et « falsifié » de son modèle chimique. Waddington juge que cette incohérence pourrait néanmoins être atténuée au moyen d'une modélisation mathématique plus

[1] "It is, I think, a major contribution to theoretical biology to show that any regular pattern at all can emerge from a system which consists initially only of homogeneous expanse disturbed by purely random processes", [Waddington, C. H., 1962], p. 128.
[2] Façon d'indiquer qu'il reconnaît à Turing le droit de lui donner des leçons de mathématiques.
[3] "In most biological systems, on the other hand, the wave length of periodic structures is related to the overall size", [Waddington, C. H., 1962], p. 128.
[4] « Embranchement d'animaux aquatiques vivant de proies capturées à l'aide de leurs appareils urticants », selon la définition du dictionnaire Robert, 1970.

poussée. Ce à quoi engagent, selon lui, ces travaux préliminaires de Turing. Ce serait notamment envisageable dans le cas où, prenant en compte le fait que le substrat n'est pas de taille infinie mais limitée (ce que Turing ne fait justement pas pour des raisons de calculabilité), les effets de bord et donc la dimension métrique des tissus affectés seraient pris en compte[1]. Alors peut-être verrait-on un modèle chimico-mathématique capable de rendre compte des homologies de structure.

Il est en tout cas très significatif que l'article de Turing ait surtout rencontré un écho favorable dans les milieux de l'embryologie organiciste. Waddington et ses collègues en biologie mathématique retiendront ainsi surtout l'idée qu'à partir d'un système d'équations différentielles couplées, on peut faire apparaître une rupture d'homogénéité dans un milieu continu. Le formalisme continuiste peut spontanément faire surgir des discontinuités et des hétérogénéités. Dons, contrairement à ce que l'on pourrait penser, l'invocation du travail de Turing restera souvent de nature conservatrice et rhétorique puisqu'elle fera signe vers ce qu'est capable de faire, contre toute attente, un type de formalisme déjà ancien et bien maîtrisé, au moins dans ses formulations, si ce n'est dans ses résolutions. Dans le cadre de la biologie mathématique, l'article de Turing sert d'abord à sauver une approche formalisée de type essentiellement continuiste. Et c'est en cela que l'ordinateur n'y joue encore que le rôle d'un calculateur.

[1] [Waddington, C. H., 1962], p. 129.

CHAPITRE 9 - La simulation conçue comme computation spatialisée : répliquer pour calculer

Du point de vue de la représentation formalisée de la morphogenèse, il en est tout autrement du travail du mathématicien Stanislaw Ulam (1909-1984). Ayant été un des premiers, avec von Neumann (1903-1957), à se servir du calculateur numérique ENIAC, et cela au départ dans une problématique de calcul numérique en physique nucléaire, Ulam a été celui qui a véritablement infléchi l'usage de l'ordinateur, d'abord du calcul vers la simulation numérique, avec la méthode de Monte-Carlo, puis de la simulation numérique vers la simulation concrètement représentative et spatialisée. En ce sens, il a été le premier à vouloir que l'ordinateur ne rende pas seulement possible la réplication du réel par simulation du hasard, mais qu'il rende aussi et surtout possible la réplication des phénomènes dans leur spatialité, dans leur hétérogénéité spatiale à première vue irréductible aux équations analytiques.

C'est en quoi on peut dire qu'il est également à l'origine des « automates cellulaires ». La genèse de cette technique de formalisation et de simulation sur ordinateur a déjà été racontée par ailleurs, mais soit dans une perspective d'une histoire de la « physique du calcul »[1], soit essentiellement pour elle-même et dans une perspective de réflexion d'épistémologie générale sur la théorie que cette notion appelle[2], ou sur la formalisation nouvelle et transdisciplinaire qu'elle suggère[3]. La fonction que cette formalisation a pu avoir dans la représentation par ordinateur de la morphogenèse biologique et de sa mise en place spatiale n'a donc été qu'incidemment étudiée. Or, c'est elle sur laquelle nous souhaitons revenir ici, fidèle à notre but de comprendre le rôle à la fois technique et conceptuel qu'a pu jouer l'émergence du calculateur numérique dans l'évolution de cette modélisation. Nous allons donc rappeler brièvement ce qui a amené von Neumann à la problématique des automates formels afin de saisir très précisément ce qui a ensuite incité Ulam à imaginer une spatialisation concrète du réseau d'automates. Car, comme nous le verrons, c'est bien un *glissement progressif* dans la représentation et dans l'interprétation de ce réseau d'automates qui a finalement mené Ulam à une analogie avec la morphogenèse biologique, mais non point une analogie immédiatement comprise comme telle et dès le début. Notre question sera donc ici la suivante : comment en est-on passé d'un problème de logique à un problème matérialisable et représentable spatialement, c'est-à-dire faisant directement représentation pour une situation biologique et non plus seulement logique ? Autrement dit, qu'est-ce qui a conduit à concrétiser et à spatialiser les représentations logiques et permis ainsi en retour une certaine logicisation des formes biologiques en même temps que leur représentation sur ordinateur ?

Les automates auto-reproducteurs et la première simulation numérique sur l'ENIAC

Rappelons tout d'abord brièvement qu'à la fin des années 1940, John von Neumann et Stanislaw Ulam avaient travaillé ensemble sur la première simulation numérique par ordinateur de la fission et de la diffusion des neutrons intervenant dans la bombe H[4]. C'est dans ce contexte qu'un peu avant, en 1945-1946, von Neumann, avait également été à l'origine de la structure des

[1] Voir [Ramunni, G., 1989] et [Chazal, G., 1996].
[2] Voir [Mosconi, J., 1989], [Heudin, J.-C., 1994], [Goujon, P., 1994a] et [Goujon, P., 1994b].
[3] Voir [Fatès, N., 2001] et [Wolfram, S., 2002].
[4] Peter Galison a relaté dans le détail cette histoire. Voir notamment [Galison, P., 1997], chapitre 8.

ordinateurs modernes qui, en substance, permettait une programmation plus souple. À partir de 1946, Ulam et von Neumann furent parmi les premiers à utiliser l'ENIAC qui venait d'être transféré à Los Alamos. Ulam, inspiré d'un côté par les récents théorèmes mathématiques sur l'ergodisme de von Neumann et Birkhoff, de l'autre par sa fréquentation du jeu de solitaire, de laquelle il avait tiré l'idée que pour estimer des probabilités de tirage de carte, il valait mieux parfois multiplier les parties et en tirer des estimations empiriques plutôt que de se livrer à des calculs mathématiques[1], mit au point en 1947 ce que Nicholas Metropolis appellera, en 1949, la méthode de « Monte Carlo »[2]. Quant à l'expression d'« automate cellulaire » proprement dite, elle est pour la première fois proposée beaucoup plus tard, en 1966, par un mathématicien et ancien élève de von Neumann, Arthur W. Burks[3]. Il entendra ainsi rassembler sous un vocable unique un ensemble de travaux qui ont cependant connu divers avatars et dont voici les jalons qui nous intéressent plus directement.

Dans les années 1948-1949, von Neumann travaille en effet à un projet qui lui est cher : sa « théorie des automates reproducteurs ». À partir de 1943, von Neumann a gravité dans les milieux de ce qui devait devenir la *Teleological Society* où il côtoie Aiken, Wiener, Goldstine mais aussi McCullochs et Pitts. Ces derniers sont les inventeurs du premier réseau de neurones formels et logiques. Leur article a été publié, on s'en souvient, par Rashevsky lui-même, en 1943. Walter Pitts était un jeune mathématicien brillant et un ancien élève de Rashevsky[4]. Selon les propos de Goldstine, le but de ces rencontres était de discuter de « l'ingénierie de la communication, des calculateurs, des systèmes de commande, des séries temporelles et de ce qui concerne la communication et la commande dans le système nerveux »[5].

C'est donc dans ce contexte que von Neumann projette l'idée de concevoir une machine qui sache se répliquer identiquement mais, selon le paradigme de la « communication », plus précisément de la « communication » de signaux[6], tel qu'il prédomine dans cette vision de la cybernétique naissante. Comme nous le verrons, et il est important de le signaler à la différence de ce qu'affirment certains récits historiques, von Neumann ne se pose donc pas encore à ce moment-là une question de morphologie ni *a fortiori* de morphogenèse. Il se sent davantage porté

---

[1] Pour le récit personnel de cette origine de la méthode de Monte-Carlo, voir [Ulam, S., 1976, 1991], pp. 196-201.

[2] Dans ses mémoires, Ulam semble s'attribuer toutefois la paternité de ce nom. Voir [Ulam, S., 1976, 1991], p. 199.

[3] Dans ses *Essays on Cellular Automata*. C'est également lui qui publiera de façon posthume le travail de son maître : *Theory of Self-Reproducing Automata*, *by John von Neumann*, ed. by A. W. Burks, Urbana, University of Illinois Press, 1966.

[4] Voir [Dupuy, J.-P., 1994, 1999], p. 51. Il est étonnant mais sans doute significatif que l'article de McCulloch et Pitts ne fasse aucune référence aux travaux que Rashevsky avait lui-même menés dans les années 1930 sur l'application de sa théorie de l'excitation et de l'inhibition des nerfs (nommée théorie des « deux facteurs ») à une structure nerveuse en *réseau* (simplifiée et hypothétique). Voir, sur ce point, [Rashevsky, N., 1960b], p. 144 et [Rosen, R., 2000], pp. 58, 120-121, 133 et 285. Rashevsky avait été jusqu'à montrer qu'une telle structure nerveuse en réseau pouvait manifester des signes de discrimination, de mémoire et d'apprentissage. Mais il n'a pas poursuivi ce travail car l'approche analytique qui était alors la sienne se trouva très vite en butte à de permanentes non-linéarités. Selon Rashevsky lui-même, comme selon un de ses autres élèves, Robert Rosen, ce serait ces travaux qui auraient été de véritables précurseurs pour McCulloch et Pitts. Ces derniers se seraient contentés, dix ans plus tard, de représenter le réseau de neurones formels, que Rashevsky avait d'abord conçu sous une forme analytique, sous une forme booléenne grâce à laquelle on peut appliquer la logique propositionnelle calculable de Whitehead, Russell et Carnap, et qu'affectionnait particulièrement McCulloch. Rosen résume cette évolution en disant qu'ils sont simplement passés de l'analyse à l'algèbre. Voir [Rashevsky, N., 1960b], p. 144 et [Rosen, R., 2000], p. 121. Ce jugement sévère, vraisemblablement partial, s'il vaut sans doute pour Pitts qui ne pouvait pas ignorer les travaux de son maître, est peut-être plus discutable pour McCulloch qui, selon Pierre Lévy, dès 1923 et de son côté, « avait imaginé une équivalence entre le calcul des propositions des *Principia Mathematica* et les règles régissant l'excitation et l'inhibition des neurones dans le réseau nerveux », (in *Cahiers du CREA*, n°7, p. 204, cité par [Pélissier, A. et Tête, A., 1995], p. 85).

[5] [Ramunni, G., 1989], p. 72.

[6] L'historien des sciences Philippe Goujon insiste sur l'importance de ce passage, antérieur historiquement, du « sens » au « signal » en physiologie théorique des phénomènes régulés, spécifiquement chez Sechenov puis chez Pavlov. Voir [Goujon, P., 1994a], p. 67. Selon Goujon, ce glissement a préparé l'approche de la première cybernétique.

à réfléchir sur un problème biologique d'apparence nettement plus *logique* que *morphologique*. C'est le problème de la reproduction des êtres vivants. Or, il se le pose en des termes informationnels et communicationnels, c'est-à-dire selon des formalismes qui réfèrent traditionnellement à une approche fonctionnelle et non structurelle du substrat biologique[1]. En outre, l'intérêt de von Neumann pour le vivant a souvent été souligné sans que l'on insiste non plus sur la parenté entre ce problème de la métaphore logique d'une fonction biologique (et non d'une structure morphologique) et une solution mathématique assez technique qu'Ulam et lui aperçoivent à la même époque pour la résolution des équations aux dérivés partielles par la méthode de Monte-Carlo. Or, sans cette parenté formelle, et avec ce seul intérêt pour la fonction biologique de reproduction, il est vraisemblable que von Neumann ne se serait pas tant investi dans une enquête sur l'automate auto-reproducteur. Et il est probable qu'Ulam n'aurait pas été tenté de lui en suggérer par la suite une représentation spatialisée. Il nous faut donc éclairer ce point. Car il apparaît de plus en plus que von Neumann ne s'est pas penché sur les réseaux d'automates uniquement pour tâcher de concevoir une machine auto-reproductrice ou bien un cerveau artificiel (en sa structure logique) mais aussi pour figurer une formalisation nouvelle ouvrant à une technique de calcul susceptible de résoudre des problèmes de calculabilité pratique pour des formules intervenant en hydrodynamique, turbulences et diffusion-multiplication, c'est-à-dire, comme il le dit lui-même d'ailleurs, avant tout pour des problèmes de « physique mathématique »[2]. Comprendre cela, c'est mieux éclairer les apports respectifs de von Neumann et Ulam dans l'histoire des simulations de la morphogenèse par ordinateur et c'est percevoir plus précisément le lieu et le moment où la physique et ses formalisations nouvelles font une place inédite au substrat biologique et à sa morphologie, et non pas simplement à la structure formelle ou informationnelle du cerveau ou des agrégats de cellules.

Il n'est pas possible d'exposer ici, dans le détail, la théorie générale des automates que préconisait von Neumann[3]. Mais rappelons quand même le contexte de naissance de cette notion. Il nous faut pour cela préciser d'abord le sens que Turing donne, le premier, à la notion d'« automate de calcul » ou « machine automatique », dans son fameux article de 1936[4]. La notion d'automate cellulaire s'en inspirera. Un automate de calcul est un objet conceptuel simple, une « boîte noire » qui possède un nombre fini d'états possibles[5]. Le fonctionnement de l'automate consiste à décrire comment on le fait changer d'état. Turing montre que n'importe quel calcul arithmétique peut être ainsi réalisé selon cette méthode. Il ouvre en conséquence la voie à la modélisation reproductrice de règles.

Modéliser n'est plus abstraire des lois mais reproduire des règles

En 1948, en effet, von Neumann montre que, conformément à ses attentes, à partir d'un certain degré de complexité, le calcul numérique, faisant intervenir des valeurs discontinues, approchées et traitées par l'arithmétique, est plus précis que le calcul analogique, c'est-à-dire que

[1] Voir les termes employés page 63 de [Neumann (von), J., 1948, 1951, 1996]. Il y est question de « connexion », de « boîtes noires » et de « réponses à des stimuli ». L'analogie du circuit électronique est bien évidemment patente et prime donc sur l'évocation de la morphologie biologique. Même s'il prétend parfois faire entr'apercevoir une formulation schématique de la « multiplication cellulaire » (*ibid.*, p. 102), le fond biologique de cet article reste donc essentiellement un renvoi permanent à la structure réticulaire et informationnelle du « système nerveux central », *ibid.*, p. 65.
[2] [Neumann (von), J., 1948, 1951, 1996], p. 61.
[3] Pour une présentation générale, voir [Ramunni, G., 1989], pp. 53-78.
[4] [Turing, A. M. et Girard, J.-Y., 1995], pp. 47-103. L'introduction de la « machine automatique » se trouve au début de l'article, §2, *ibid.*, page 52.
[5] Pour une présentation classique mais plus circonstanciée, voir [Adami, C., 1998], pp. 22-26.

le calcul classique avec des grandeurs continues[1]. Il prolonge alors le résultat de Turing au sujet de la « machine automatique universelle » selon lequel un automate peut fonctionner comme un autre automate dès lors qu'on lui fournit les fonctions adéquates[2]. En vertu de ce théorème en effet, la nature même d'un automate doit, selon lui, pouvoir être avantageusement « modélisée » par un autre automate. La motivation principale des recherches de von Neumann en 1948 réside bien dans le projet de concevoir des automates producteurs d'eux-mêmes (auto-reproducteurs) et ainsi d'élargir la notion d'automate de calcul.

Mais, ce faisant, von Neumann n'a pas du tout l'intention de développer des mathématiques gratuites, coupées de toute préoccupation concrète. Ce qui l'intéresse aussi, c'est de rendre un automate analogue à la *logique* qui anime les être vivants avec leur faculté de se reproduire. C'est ce qu'il désigne comme un des « aspects fonctionnels de l'organisation dans la nature »[3]. Or il montre que les automates formels sont de bons *modèles du vivant* à la condition qu'ils aient eux-mêmes cette particularité d'être *à eux-mêmes* leur *propre modèle*, c'est-à-dire à la condition qu'ils puissent se reproduire. Ces automates portent alors en eux-mêmes leur propre modèle, parce qu'ils contiennent les plans de la production d'un automate qui leur est identique. Ils sont ainsi leur propre modèle, mais en un sens nouveau, au sens d'un modèle de conception, d'un modèle logique de production conçu à l'image d'un plan de machine automatique. Dans ces automates reproducteurs en effet, moyennant certaines précautions qui fait que l'on distingue un mécanisme de contrôle d'un mécanisme de copie d'instructions[4], la représentation et la production se confondent. Faire fonctionner un de ces automates, c'est en fabriquer un et fabriquer un de ces automates, c'est en faire fonctionner un.

Or, von Neumann montre qu'à partir d'une certaine complexité numérique (un assez grand nombre d'instructions), la conception de ces objets analogues au vivant est envisageable[5]. Il veut ainsi rendre manifeste l'analogie entre une machine formelle auto-reproductrice et le vivant. Aussi n'hésite-t-il pas à écrire que, dans le cas particulier où l'on a un automate reproducteur, « [une instruction] a en gros les fonctions d'un gène »[6]. Il rapproche alors ostensiblement les automates reproducteurs de la fonction essentiellement ambivalente des gènes : construire en instruisant et se reproduire à partir du substrat qu'ils ont instruit. L'ambition de von Neumann est donc bien de mettre en évidence les analogies que l'on peut faire entre les êtres vivants et les machines à calculer numériques. Lorsqu'à la même époque Turing s'intéresse à la mise en forme du vivant en vue de la conception d'un cerveau artificiel et de son incarnation, von Neumann s'intéresse plutôt à l'auto-reproduction comme propriété générique du vivant pour tenter d'affronter l'obstacle de principe que semble opposer à toute tentative de modélisation ce qu'il appelle la « complexité » du vivant. Il définit alors cette « complexité » comme ce qui caractérise un objet dont la plus simple description ne peut être que lui-même[7].

Mais, même si l'on accepte une simplification à l'extrême de la représentation du substrat biologique, il demeure dans les propos de von Neumann une ambiguïté qui peut expliquer en

---

[1] [Neumann (von), J., 1948, 1951, 1996], pp. 72-73: « La véritable importance d'une procédure digitale réside donc bien dans sa capacité à réduire le niveau de bruit relatif dû au calcul dans des proportions qui sont complètement inaccessibles dans toute autre procédure (analogique). En outre, il est de plus en plus difficile de réduire le niveau de bruit dans une machine analogique alors que c'est de plus en plus facile pour une machine digitale […] C'est ici, et non dans sa fiabilité absolue mais sans intérêt pratique, que réside l'importance de la procédure digitale ».
[2] [Turing, A. M. et Girard, J.-Y., 1995], §§6-7, pp. 66-71.
[3] [Neumann (von), J., 1948, 1951, 1996], p. 62.
[4] [Neumann (von), J., 1948, 1951, 1996], p. 102. Pour une présentation plus circonstanciée, voir [Emmeche, C., 1994, 1999], pp. 51-57.
[5] [Neumann (von), J., 1948, 1951, 1996], p. 102.
[6] [Neumann (von), J., 1948, 1951, 1996], p. 102.
[7] [Neumann (von), J., 1948, 1951, 1996], p. 94.

partie ce qui a empêché que la biologie ne s'en saisisse immédiatement, mise à part la neurobiologie théorique avec ce qui deviendra le programme de l'intelligence artificielle à partir de 1956 et du colloque de Darmouth. Car, à la fin du texte de 1948, avec la démonstration de la faisabilité de l'auto-reproduction formelle, on ne sait finalement pas si von Neumann aboutit à un modèle très simple de multiplication cellulaire, donc valable au niveau des cellules matérielles d'un organisme vivant, ou à un modèle de fonctionnement du cerveau où la notion de reproduction joue cette fois-ci à un niveau cognitif[1]. La « neurologie »[2] devient en fait incidemment un modèle pour la morphogenèse. Le glissement vers la problématique cognitive du formalisme des automates, censée au départ contribuer à une théorie de la reproduction organique, peut s'expliquer par le fait que von Neumann laisse dans l'ombre une problématique physico-mathématique qui a pourtant été, pour lui comme pour Ulam, décisive. Nous reviendrons sur cette hypothèse en temps utile.

Toujours est-il que c'est une modélisation d'un nouveau genre qui est introduite par ces travaux sur la difficulté de modéliser le vivant. Quand la logique du biologique est un modèle de modélisation, la modélisation formelle peut faire évoluer ses formalismes. La modélisation n'est plus seulement ici le fait d'observer le réel, d'en simplifier l'image puis de le refléter dans le comportement de langages mathématiques pourvus de lois de construction arithmétiques, algébriques ou géométriques et de choisir enfin parmi ces langages celui qui décrit le mieux ce réel. Car ce genre nouveau de modélisation du vivant par des automates reproducteurs annule de fait la distance entre le modélisé et le modélisant. Il n'y a de modélisation que parce que le modélisé est en même temps modélisant. La modélisation n'est plus une abstraction représentative à partir du modélisé puisqu'elle est inséparable de la production de ce modélisé, de sa reproduction, c'est-à-dire du fait qu'il fonctionne et se donne à voir. Modéliser en ce sens signifie produire et reproduire, mais non plus représenter directement de façon abstractive.

Une genèse logique sans morphogenèse chez von Neumann

Pour ce qui est des êtres vivants dont von Neumann essaie d'extraire la fonction logique qu'il juge essentielle, la modélisation devient la capacité de produire des êtres logiques qui interagissent entre eux dans l'autonomie, à la façon d'un être vivant. Modéliser la reproduction dans ce cadre-là, ce n'est donc plus tout à fait abstraire, c'est reproduire la capacité de reproduction. C'est donc parce que l'objet que von Neumann veut modéliser possède une propriété essentielle, étrange et inédite, que la méthode de modélisation mathématique en ressort elle-même transformée. Elle devient une façon de doubler la réalité en en produisant des modèles purement logiques et numériques. La réussite de la modélisation réside alors seulement dans l'identité présumée entre les règles d'interaction interne du système vivant et celles du système logique. La modélisation s'apparente ainsi à la recherche de règles, les règles d'un jeu de production qui soit en même temps un jeu de reproduction. Elle devient une modélisation formelle mais ascendante. Elle est une méthode de formalisation qui part d'éléments aux comportements simples (les règles) et qui se complexifie, étape par étape. À l'issue de ce processus, la complexité atteinte est le plus souvent non représentable de manière analytique et condensée.

Car la difficulté de cette modélisation tient à ce qu'elle n'est plus mathématique et déductive au sens d'une mathématique des structures, comme l'algèbre, mais inductive et logique de par son constructivisme pas à pas. Von Neumann a ainsi conscience que l'on a affaire à des

[1] [Neumann (von), J., 1948, 1951, 1996], p. 94.
[2] [Neumann (von), J., 1948, 1951, 1996], p. 94.

objets formels mal connus et auxquels manquent encore une véritable théorie générale[1] puisque les automates n'ont pas été conçus axiomatiquement *à partir de leurs relations* (comme dans une théorie mathématique de structures) mais *à partir de leurs propriétés intrinsèques* et exprimées sous forme de règles de comportement individuelles[2].

Von Neumann ne cherche pourtant pas tout de suite à donner une représentation spatialisée de cette auto-reproduction. Il lui suffit d'en avoir montré la possibilité logique à partir de propriétés formelles intrinsèques et minimales. Il évoque cependant bien l'analogie que l'on pourrait immédiatement faire avec la reproduction cellulaire. Mais, dans ce passage, on voit qu'il n'a d'abord aucunement en tête la perspective d'une morphogenèse matérielle et donc spatialisée :

« Il est clair également que le mécanisme de duplication de B [un automate qui peut faire une copie de n'importe quelle instruction] effectue l'acte fondamental de la reproduction, la copie du matériau génétique, qui est l'opération fondamentale de la multiplication des cellules vivantes. »[3]

Von Neumann n'entend ici parler que d'un « acte » de *genèse logique* mais pas d'un « acte » de *genèse spatiale*. L'automate qui naît des productions du premier a une existence *in abstracto* et indépendante de tout dimensionnement ou de toute problématique concrète. Il est donc très important de comprendre qu'en 1948, von Neumann ne songe aucunement à intégrer directement sa notion d'automate auto-reproducteur à des modèles de morphogenèse biologique. Ce qui l'intéresse d'abord, c'est un problème logique, pas un problème morphologique. Il ne voit pas de lien immédiat entre les deux, d'autant plus que même par la suite, il ne se piquera d'avoir des connaissances biologiques sommaires qu'en matière de cerveau et non en embryologie[4].

Par la suite toutefois, fidèle à son souci de la réalisabilité pratique de ce qu'il conçoit, von Neumann veut expliciter les règles logiques élémentaires nécessaires et suffisantes pour un automate reproducteur. Il lui faut donc aller jusqu'à une conception précise, tout au moins sur le papier, de cet automate reproducteur. Il la cherche d'abord sous la forme de ce que Arthur W. Burks appellera un « système à automate cinématique »[5]. Dans ce premier modèle matériel de l'automate logique auto-reproducteur, von Neumann focalise son attention sur les *mouvements* que doivent produire les opérateurs de lecture et de reproduction de son automate pour aller quérir les matériaux nécessaires[6]. Comme on le sait, il va parvenir à cette représentation cinématique

---

[1] [Neumann (von), J., 1948, 1951, 1996], p. 82 : « Nous sommes très loin de disposer d'une théorie des automates qui mérite ce nom, à savoir une véritable théorie mathématique logique. » Voir également [Neumann (von), J., 1958, 1996], p. 14 : « Je voudrais noter en passant, qu'il serait très satisfaisant de pouvoir parler d'une 'théorie' au sujet de ces automates. Malheureusement tout ce dont nous disposons à l'heure actuelle n'est qu'une 'masse d'expériences' mal articulée et peu formalisée. »

[2] Par exemple, s'agirait-il encore de mathématiques aux yeux du groupe Bourbaki ? Voir [Le Lionnais, F., 1962], p. 22 : « Entendues ainsi, les mathématiques se réduisent à l'étude de lois très générales s'appliquant à des collections d'éléments qui ne sont plus nécessairement des nombres ou des points. » Voir de N. Bourbaki lui-même : « Faire la théorie axiomatique d'une structure donnée, c'est déduire les conséquences logiques des axiomes de la structure *en s'interdisant toute autre hypothèse* sur les éléments considérés (en particulier, toute hypothèse sur leur 'nature' propre) », *ibid.*, p. 41. C'est l'auteur ('Bourbaki') qui souligne. Plus loin on lit le passage souvent cité : « Dans la conception axiomatique, la mathématique apparaît en somme comme un réservoir de *formes abstraites* – les structures mathématiques ; et il se trouve – sans qu'on sache bien pourquoi – que certains aspects de la réalité expérimentale viennent se mouler en certaines de ces formes comme par une sorte de préadaptation », *ibid.*, p. 47. La notion de « réservoir de formes vides » est reprise de [Weyl, H., 1949, 1963], p. 25.

[3] [Neumann (von), J., 1948, 1951, 1996], p. 102.

[4] [Neumann (von), J., 1958, 1996], p. 13.

[5] [Burks, A. W., 1970], pp. 3-5.

[6] Voir [Emmeche, C., 1994, 1999], pp. 54-56.

hypothétique. Mais, c'est à partir de là que la figure et l'approche de son collègue Ulam prennent du poids. Nous allons donc en venir à cet autre mathématicien de Los Alamos afin de mesurer son apport personnel, notamment dans cette idée de rendre « cellulaires » donc spatiaux, ou au moins topologiquement répartis, les automates et ainsi de comprendre ce qui le conduira ensuite à faire simuler les premières formes ramifiées sur un ordinateur.

La réduction des mathématiques à une visualisation combinatoire chez Ulam

Après leur développement commun de la théorie ergodique puis surtout de la méthode de Monte-Carlo, et contrairement à von Neumann[1], Ulam, à la fin des années 1940, se résout à donner un poids tout à fait considérable à l'analyse combinatoire aussi bien en physique théorique, en mathématique qu'en logique. À partir de 1946, c'est-à-dire à partir de son retour à Los Alamos, il en fait son cheval de bataille. Il a été en effet frappé par la grande généralité du domaine d'application de cette méthode qu'il ne concevait d'abord que comme un échantillonnage statistique de fonctions déterministes, produit dans le but de résoudre les équations non linéaires auxquelles ces fonctions obéissent souvent, notamment en hydrodynamique. Ulam explique lui-même que c'est la mise à disposition de machines à calculer numériques et à grande vitesse qui lui fait concevoir l'intérêt de développer une procédure mathématique heuristique très générale au moyen de cette méthode de Monte-Carlo[2]. En outre, Ulam a auparavant été sensibilisé à l'importance des procédures heuristiques, non seulement dans les sciences de la nature, mais également et surtout en mathématique de par sa fréquentation du mathématicien hongrois George Polya (1887-1985)[3], alors en poste à Stanford. Mais Ulam déplace l'analyse de la procédure heuristique du terrain psychologique vers le terrain physique et cela non sans raison de son propre point de vue. Il se représente en effet le fonctionnement du cerveau comme un jeu où les opérations sont fractionnées, interactives et où certaines parties jouent le rôle de stimuli dans la production d'idées alors que d'autres parties fournissent des réactions à ces premières propositions de pensée[4]. Tout cela restant majoritairement inaccessible à la pensée consciente et verbale, l'approche de Polya ou de Poincaré, bien qu'intéressante et allant selon lui dans le bon sens puisque rapprochant les procédures de construction des solutions mathématiques des procédures des sciences de la nature, lui paraît donc ne s'en tenir qu'à la partie émergée de l'iceberg.

En 1949, la méthode de Monte-Carlo a certes clairement pour lui comme première fonction de permettre « l'exploration de modèles physiques »[5] pour tester et vérifier leur formulation mathématique. Mais elle peut de surcroît légitimement s'étendre à une sorte de mise en place

---

[1] N'oublions pas que von Neumann a été un élève de Hilbert.
[2] [Ulam, S., 1949], p. 207 et [Ulam, S., 1976, 1991], p. 197.
[3] George Polya était né à Budapest en 1887. Il fit des études de philosophie et de mathématiques à l'Université de Budapest à partir de 1905. Il soutint son doctorat en théorie des probabilités en 1912. Il y montrait que certains problèmes de diffusion sont traitables mathématiquement par passage à la limite d'une marche au hasard discontinue sur une droite ou dans un espace à deux ou trois dimensions. Voir l'article de G. Darmois et D. Dugué *in* [Taton, R., 1964, 1995], p. 86. À partir de 1914, il enseigne les mathématiques à l'Institut Fédéral de Technologie de Zürich. En 1940, il s'exile aux Etats-Unis. Il s'installe à Palo-Alto (Californie) en 1942 et devient professeur à Stanford. Il fut auparavant un des professeurs de von Neumann à Zürich. À la suite de Euler (1707-1783) et de Poincaré (1854-1912), il s'était toujours intéressé aux procédures psychologiques de découvertes des démonstrations en mathématiques. Cela l'avait amené en 1945 à la publication d'un ouvrage sur la résolution de problèmes mathématiques qui eut beaucoup de succès : *How to solve it*. Pour ces indications biographiques, nous avons consulté la préface de Ian Stewart à la réédition de cet ouvrage : [Polya, G., 1945, 1957, 1990], pp. xiii-xiv.
[4] Voir [Ulam, S., 1976, 1991], pp. 180-181.
[5] "exploring new physical models", [Ulam, S., 1949], p. 207.

physicalisée d'une approche heuristique générale de problèmes de « mathématiques pures »[1]. Or, on peut attribuer cette tendance à *physicaliser* les problèmes mathématiques au fait qu'Ulam se vit et se pense avant tout comme un mathématicien visuel. Il est, de son propre aveu, doté d'une mémoire davantage « visuelle »[2] et les détails logiques ne l'intéressent guère en mathématiques, surtout, et ses collègues l'ont remarqué, depuis 1946, c'est-à-dire depuis qu'il a réchappé de cette grave encéphalite virale au cours de laquelle il a perdu pendant plusieurs jours l'usage de la parole, avant de recouvrer progressivement et pleinement ses facultés[3]. Dans son autobiographie de 1976, il écrit en effet :

« *Lorsque je pense à des idées mathématiques, je vois les notions abstraites dans des images symboliques. Elles sont des assemblages visuels, une image schématisée, par exemple, d'ensembles de points réels du plan. À la lecture de formulations comme 'une infinité de sphères ou une infinité d'ensembles', je me figure une image de tels objets presque réels, devenant de plus en plus petits et disparaissant sur quelque horizon.* »[4]

On le comprend : face à la nécessité qu'il ressent de concrétiser, de physicaliser les notions abstraites, à partir de son retour à Los Alamos en 1946, le recours au *computer* donne donc à Ulam la possibilité inédite d'extérioriser cette pratique intellectuelle, d'ordinaire conçue comme essentiellement logique, et de l'exercer à grande échelle et quasi-empiriquement grâce aux capacités de mémoire, aux traitements en parallèle de diverses règles élémentaires et à la vitesse de calcul inédite de cette machine.

En fait, en ce qui concerne cette fois-ci plus particulièrement son souhait plus pragmatique de voir se prolonger les soutiens financiers en faveur du développement des calculateurs électroniques, ce n'est bien sûr pas non plus un hasard qu'il exprime cette idée de recourir à des « modèles physiques » à Harvard, c'est-à-dire précisément lors du second symposium sur les machines à calculer digitale à grande échelle : il s'agit d'y défendre le rôle que ces machines peuvent avoir au-delà des seules applications calculatoires directes et déjà développées. Ces machines sont destinées selon lui à entrer bientôt dans tous les laboratoires, sans exception, toutes spécialités confondues. Il n'hésite pas à provoquer les mathématiciens en leur annonçant qu'ils ont tort de négliger ce qu'ils ne considèrent souvent que comme une machine à calculer. Selon son aveu, c'est une période de sa vie au cours de laquelle il a délibérément produit de nombreuses communications, qu'il qualifiera de « *'propaganda' talks* »[5], au sujet de cette méthode de Monte-Carlo généralisée et instrumentée par les nouveaux calculateurs numériques. C'est dire toute l'importance à la fois épistémologique, scientifique et technique qu'il confère à cette proposition.

Mais comment procède-t-il pour montrer cela ? Et qu'entend-il par approche heuristique des mathématiques pures ? Son raisonnement se présente en fait en deux temps dans l'article de 1949. Il rappelle d'abord que la méthode de Monte-Carlo touche en elle-même à une partie importante mais peu explorée de la mathématique pure car étant dépourvue de théorie générale :

---

[1] [Ulam, S., 1949], p. 207.
[2] [Ulam, S., 1976, 1991], p. 183 : "It is said that seventy-five percent of us have a dominant visual memory, twenty-five percent an auditory one. As for me, mine is quite visual", [Ulam, S., 1976, 1991], p. 183.
[3] Voir le récit de cet épisode douloureux *in* [Ulam, S., 1976, 1991], pp. 174-181.
[4] "When I think about mathematical ideas, I see the abstract notions in symbolic pictures. They are visual assemblages, for example, a schematized picture of actual sets of points on a plan. In reading a statement like 'an infinity of spheres or an infinity of sets', I imagine a picture with such almost real objects, getting smaller, vanishing on some horizon", [Ulam, S., 1976, 1991], p. 183.
[5] [Ulam, S., 1976, 1991], p. 200.

elle consiste en une « production 'physique' de modèles de situations combinatoires »[1]. Parce qu'elle repose sur les processus de « multiplication » (selon le terme d'abord utilisé par Ulam et issu de la physique nucléaire) ou processus de « ramification », dont Theodore E. Harris développe à la même époque une présentation systématique[2], elle est une approche empirique, parce que stochastique, des configurations combinatoires et de branchaison. Par le fait qu'elle intègre un point de vue stochastique et visuel (côté empirique) sur la ramification et donc la combinatoire (côté mathématique), cette méthode a pour vertu de concrétiser et de rendre empirique une problématique purement mathématique. Elle jette donc un pont entre l'empirie des modèles physiques simulés sur calculateur numérique et la diversité des configurations combinatoires, quant à elles abstraites mais encore trop peu théorisées.

La seconde étape du raisonnement de Ulam consiste à montrer que, finalement, beaucoup des autres branches des mathématiques peuvent, à certains égards, être rapportées à l'analyse combinatoire comme l'analyse fonctionnelle ou même la logique[3]. Prenons le cas de l'étude des systèmes formels et donc de la métamathématique en général. On y trouve l'étude de classe d'ensembles sur lesquels on applique des opérations booléennes et des quantificateurs. Or, Ulam rappelle que, dans une approche de géométrie projective, on peut donner une interprétation intégralement géométrique non seulement bien sûr des opérations booléennes mais aussi et surtout des quantificateurs $\exists$ et $\forall$ [4] de la logique propositionnelle. Et il en conclut :

« Un théorème mathématique peut être formulé dans ce langage comme spécifiant qu'un certain ensemble de la classe obtenue est vide. Dans les cas où une preuve apparaîtrait très difficile, il pourrait être intéressant d'essayer de construire, pour ainsi dire, des points de cet ensemble par des choix aléatoires faits sur les ensembles de départ ou sur les valeurs des 'variables libres' dans l'espace à n dimensions. L'échec dans l'obtention d'un de ces points après un grand nombre de choix conduirait alors à la croyance que si l'ensemble n'est pas vide, il est petit. Il est clair qu'une preuve ne sera jamais obtenue de cette façon. Cependant, la valeur heuristique d'une telle procédure ne devrait pas être négligeable. »[5]

On voit donc que la seconde étape du raisonnement, en rapportant la construction de la preuve mathématique elle-même à un processus aléatoire, par un effet de transitivité, tend à montrer la possibilité, pour l'ensemble des mathématiques pures, de recourir à une approche heuristique dont la formalisation devra beaucoup aux « expérimentations » sur calculateur de « modèles physiques » granulaires et stochastiques. Il s'ensuit que la méthode de Monte-Carlo modélisée sur calculateur numérique peut être utile pour pratiquement tous les secteurs des

[1] "'physical' production of models of combinatorial situations", [Ulam, S., 1949], p. 207.
[2] [Ulam, S., 1952], p. 274.
[3] Peter Galison, dans son travail, a également rapporté quelques unes des grandes lignes de ce raisonnement mais pour insister surtout sur le « créole » qu'Ulam contribue ainsi à instaurer en décloisonnant l'approche que les ingénieurs ont des problèmes de physique, spécialement en hydrodynamique, de celles qu'ont les mathématiciens. Voir [Galison, P., 1997], pp. 753-755. Pour notre part, nous voulons surtout mettre au jour ce qui incite Ulam à spatialiser les automates de von Neumann.
[4] [Ulam, S., 1949], p. 211.
[5] "A mathematical theorem can be formulated in this language as stating that a certain set of the class obtained is vacuous. In cases where a proof would appear very difficult it might be of value to, so to say, try to construct points of it by random choices of the starting sets or values of 'free variables' in the n-dimensional space. The failure to obtain any after a great number of choices would then lead to the belief that if the sets is not vacuous it is small. It is clear that a proof will never be obtained in this fashion. However the heuristic value of such a procedure might not be negligible", [Ulam, S., 1949], p. 211.

mathématiques et de la physique mathématique dans la mesure où cela peut mettre sur la piste d'un résultat général inaperçu par la seule intuition consciente.

Lorsque rétrospectivement Ulam se penchera sur ce travail mathématique, il évoquera sa réaction face à un propos bien connu de Laplace :

« J'avais l'impression que, d'une certaine manière, on pouvait inverser un jugement de Laplace. Il affirme qu'une théorie de la probabilité n'est rien d'autre que du calcul appliqué au sens commun. Monte Carlo, c'est du sens commun appliqué à la formulation mathématique de processus et de lois physiques. »[1]

Selon Ulam, il faut donc prendre la mesure du fait que ce qu'il propose peut s'interpréter comme un changement dans la hiérarchie et la prééminence respectives des disciplines mathématiques, en particulier entre probabilité et calcul, dans le cadre de la modélisation mathématique pour la physique. Cette approche qui est la sienne se révèlerait donc comme anti-laplacienne, le préfixe « anti » étant à comprendre ici en un sens directionnel : il faudrait retourner le propos de Laplace. Pour sa part, le « sens commun appliqué aux formulations mathématiques » réfère à l'aléa mais aussi à la physicalisation et à la visualisation ou spatialisation, qui en même temps que l'aléa, affectent les formalismes. Le « sens commun » renvoie donc aussi à ce qui s'oppose à l'abstraction habituelle des modèles mathématiques. À en croire cette indication d'Ulam, et au regard de sa suggestion heuristique générale, les modèles mathématiques deviennent et sont appelés à devenir de plus en plus intuitifs pour inspirer ensuite seulement, et s'il y a lieu, la formulation de modèles abstraits. Cette interprétation, remarquons-le, se fait toutefois au prix d'une distorsion du propos initial de Laplace. Dans le passage auquel Ulam pense, Laplace parlait de « bon sens »[2] et non de « sens commun ». Il avait d'ailleurs consacré une grande partie de la fin de l'*Essai* de 1814 au rôle critique que peut jouer le calcul des probabilités vis-à-vis des certitudes morales courantes, mais erronées, sur les futurs contingents. Le « bon sens », à savoir au moins le jugement moral si ce n'est la raison au sens de Descartes, se trouvait ainsi rectifié, comme rendu « droit » par le calcul. Ulam procède donc ici à un glissement vers une interprétation « sensitive » ou « sensualiste » qui nous semble bien confirmer cette tendance à physicaliser le formalisme probabiliste. Alors que Laplace évoque plutôt les probabilités morales, et avec elles le « bon sens », moral et juste, de l'homme d'action, Ulam infléchit la citation et veut comprendre qu'il s'agit surtout de ce qui est senti communément et intuitivement par nos sens et non point par notre sens moral.

Quand le calculateur numérique est … analogique, il simule !

Mais ce qu'il est également très important de noter ici, c'est qu'Ulam emploie dans ce même contexte le terme d'« expérimentation »[3]. Or, ce qui fait selon lui le caractère empirique du

[1] "I felt that in a way one could invert a statement by Laplace. He asserts that the theory of probability is nothing but calculus applied to common sense. Monte Carlo is common sense applied to mathematical formulations of physical laws and processes", [Ulam, S., 1976, 1991], p. 200. La phrase de Laplace (qu'Ulam cite de mémoire) dit exactement : « On voit par cet Essai [*Essai philosophique sur les probabilités*] que la théorie des probabilités n'est au fond que le bon sens réduit au calcul : elle fait apprécier avec exactitude, ce que les esprits justes sentent par une sorte d'instinct, sans qu'ils puissent souvent s'en rendre compte », [Laplace, P. S. (de), 1814, 1986], p. 206.

[2] Qui aurait donc dû être traduit par "good sense" et non par "common sense". Ainsi, le « bon sens » de la célèbre première phrase du *Discours de la méthode* est toujours traduit par "good sense". Voir par exemple la traduction intégrale de cette œuvre à l'adresse de la *Classical Library* : http://www.classicallibrary.org/descartes/discourse/.

[3] [Ulam, S., 1949], p. 208.

modèle sur calculateur, c'est que les formalismes qu'il combine sont de nature statistique. Ulam ne veut pourtant pas dire ici que c'est parce qu'elle réserve des surprises à l'utilisateur que la nature statistique de cette modélisation la rend quasiment identique à une expérimentation. Son argument n'est pas d'ordre phénoménologique ni pragmatiste ou subjectiviste sur ce point précis. Il va en fait plus loin que cela. Ainsi il écrit :

« Il est bien sûr évident que l'on peut étudier 'expérimentalement' le comportement des solutions d'équations qui elles-mêmes décrivent un processus aléatoire, en utilisant le calculateur digital comme une machine à analogie [« analogy machine »] comme cela a déjà été le cas [suit une référence à un travail antérieur de Ulam et Metropolis]. »[1]

Là aussi, on trouve donc une manière de transitivité dans l'argumentation. Mais celle-ci nous permet de légitimer non plus l'interprétation des formalismes mathématiques par d'autres formalismes approchants, mais l'évolution du statut de la machine elle-même vis-à-vis du traitement des mathématiques en physique. La machine passe ainsi du rôle de calculateur approché à celui de réservoir de particules « fictives »[2] et simulées. Dans ce contexte, le calculateur numérique mérite désormais le nom de *simulateur*, comme les calculateurs analogiques auparavant, parce qu'avec la position stochasticiste[3] et granulaire qui caractérise l'approche de Ulam, on peut voir une réelle *analogie* entre ce que font les particules réelles et ce que fait le calculateur. Par l'effet d'un paradoxe assez curieux mais finalement compréhensible du fait même de ces déplacements progressifs dans le statut accordé aux formalismes, on peut dire que c'est parce que le calculateur *numérique* est en même temps *analogique* (de par cette vision granulaire et stochastique) qu'il devient un *simulateur*, au même titre que les calculateurs analogiques du début du siècle, et qu'il permet donc des *expérimentations*.

Du stochasticisme à la spatialisation : le rôle des théorèmes sur les transformations linéaires

À partir de ce que nous avons rappelé précédemment au sujet de l'approche inséparablement technique et épistémologique de Stanislaw Ulam, le fait que ce soit lui qui, en 1951, ait poussé von Neumann à spatialiser sous la forme d'un réseau cristallin la représentation de son réseau d'automates paraît déjà moins surprenant[4]. Comme le montre un grand nombre de ses publications de l'époque, Ulam est alors pénétré des leçons que l'on peut tirer de la généralité de la méthode de Monte-Carlo. Et, par ailleurs convaincu par les arguments de von Neumann sur la supériorité à terme de la technologie numérique, il travaille de son côté en mathématicien à élargir le spectre des usages de ces machines. Or, ce faisant, comme nous l'avons vu, il procède à une espèce de respatialisation de l'analyse combinatoire, de l'analyse fonctionnelle et finalement

[1] "It is of course obvious that one can study 'experimentally' the behavior of solutions of equations which themselves describe a random process, by using the digital computer as an analogy machine, as it were [N. Metropolis and S. Ulam, 'The Monte-Carlo method', *J. Am. Statist. Assoc.*, 44, 335-341,]", [Ulam, S., 1949], p. 208.
[2] [Ulam, S., 1949], p. 209.
[3] L'historien des sciences P. Galison appelle « stochasticisme » cette option épistémologique et ontologique qui veut que le monde soit discret et « régi » par des événements stochastiques élémentaires. Von Neuman, Ulam et surtout le chimiste Gilbert King ont été séduit par cette interprétation de la méthode de Monte-Carlo. Voir [Galison, P., 1996], pp. 125 et 144. En fait, nous dirions qu'Ulam est moins convaincu par l'importance du caractère aléatoire des éléments que par celle de leur répartition spatiale et granulaire.
[4] "I proposed to him [von Neumann] some of my own ideas about automata consisting of cells in a crystal-like arrangements", [Ulam, S., 1976, 1991], p. 241. Voir également [Burks, A. W., 1970], p. 7.

de la logique et des métamathématiques *via* la géométrie projective et la méthode de Monte-Carlo. La formalisation antérieure des processus nucléaires de diffusion-multiplication par des processus stochastiques de ramification, venant eux-mêmes en partie de préoccupation propres à la dynamique des populations[1], a donc beaucoup fait pour introduire cette spatialisation générale des formalismes. C'est la mise à disposition de calculateurs numériques qui avait fortement contribué à suggérer à von Neumann, Metropolis et Ulam l'usage de ce nouveau formalisme pour la conception de la bombe H. C'est également l'existence de calculateurs numériques à grande vitesse, se révélant très performants d'une part pour manipuler des représentations discrétisées et, d'autre part, pour tirer des nombres pseudo-aléatoires, qui incite par la suite Ulam à élargir cette discrétisation et cette spatialisation à tout formalisme jusque dans le cadre même de la théorie des automates de von Neumann[2]. On peut enfin conjecturer que les conversations nombreuses et approfondies qu'Ulam avait eu avec son vieil ami de la *Society of Fellows* de Harvard, le philosophe Alfred North Whitehead (1861-1947), n'ont pas joué pour rien dans cette vision tout à la fois atomisée et répartie des processus physiques[3].

Mais les indices techniques dont nous disposons sont encore plus nets si l'on veut confirmer l'influence de Ulam sur cette question de la spatialisation. Car, dans le cadre des prolongements des théorèmes sur l'ergodisme, von Neumann et Ulam avaient auparavant montré un résultat mathématique important et qui tendait à tempérer le rôle du caractère aléatoire des processus impliqués dans la méthode de Monte-Carlo[4]. Il existe ainsi un moyen de faire du Monte-Carlo sans processus stochastique. Mais cela nécessite que l'on ait recours à des itérations de transformations linéaires sur un espace infini[5]. Ulam revient particulièrement sur ce point de mathématique dans son article de 1952 intitulé « Processus aléatoires et transformations »[6]. Ulam y insiste beaucoup sur le fait qu'il ne faut pas considérer le caractère aléatoire comme une propriété mathématique essentielle et irréductible à quoi que ce soit d'autre. Cette indication doit nous faire comprendre que le stochasticisme d'Ulam tient beaucoup moins au privilège qu'il accorde à l'aléa qu'au grand cas qu'il fait de l'atomisation, si l'on peut dire, ou plutôt de la discrétisation et de la ramification qui se trouve par ailleurs si intuitivement représentable dans l'espace géométrique trivial[7]. D'où cette phrase essentielle :

---

[1] On conçoit que les phénomènes de multiplication et de diffusion des noms de famille incitent à spatialiser les formalismes d'une façon beaucoup moins directe et beaucoup plus figurée que cela n'a été les cas pour les processus de diffusion-multiplication de la physique nucléaire. La physique nucléaire a donc enseigné aux formalismes de la dynamique des populations à se spatialiser, d'abord pour son propre usage. On voit là l'indice d'une influence de notre intuition directe des phénomènes à échelle humaine sur l'interprétation des formalismes que l'on se donne, même les plus apparemment abstraits.

[2] [Ulam, S., 1952], p. 274.

[3] Ulam fait la connaissance de Whitehead en 1936, à Harvard. Ce dernier y est alors *Senior* de la *Society of Fellows.* Après une carrière de logicien et de mathématicien en Angleterre, à Cambridge puis à l'Université de Londres, Whitehead avait enseigné la philosophie à Harvard à partir de 1924 ; et il est professeur émérite lorsque sa femme et lui se lient d'amitié avec le couple Ulam. Dans ses mémoires, Ulam ne cache pas son admiration quasi-filiale pour Whitehead, sa pensée et sa hauteur de vue. Il est même un passage qui évoque dans le même contexte les automates cellulaires et la pensée des « procès » telle que l'avait énoncée Whitehead : "The Conway Game of Life is an example of a game or pastime, which, perhaps much like the early problems involving dice and cards, has led ultimately to the present edifice of probability theory, and may lead to a vast new theory describing the 'processes' which Alfred North Whitehead studied in his philosophy", [Ulam, S., 1976, 1991], p. 285. Nous ne disposons cependant pas d'autres documents attestant de ce lien intellectuel entre Ulam et Whitehead. Nous n'en dirons donc pas plus. En ce qui concerne Whitehead et son rôle dans les théories de la croissance, il nous paraît plus avéré dans les travaux de Woodger (voir *supra*).

[4] [Ulam, S., 1952], p. 266.

[5] Voir une brève allusion *in* [Ulam, S., 1976, 1991], p. 200.

[6] [Ulam, S., 1952], p. 264.

[7] Les processus de ramification sont très souvent et naturellement représentés par des graphes de choix, des ramifications, des arbres.

« On devrait se rappeler que la distinction entre un point de vue déterministe et un point de vue probabiliste réside souvent seulement dans l'interprétation et non dans le traitement mathématique lui-même. » [1]

Ainsi, comme l'avaient démontré Dodd, Hopf et Khintchine[2] et comme le rappelle Ulam, si l'on dispose d'un ensemble de nombres réels exprimés en format binaire, avec une transformation déterministe des nombres les uns en les autres définie par un simple décalage de 1 dans le développement binaire, le théorème ergodique s'applique à cette transformation alors même qu'elle est déterministe. Donc il n'est pas en soi nécessaire d'avoir recours à des nombres pseudo-aléatoires sur calculateur (d'ailleurs générés eux-mêmes par de telles transformations déterministes) pour utiliser la procédure heuristique que prône Ulam.

Ulam suggère alors qu'on applique cette procédure à un système physique présentant une infinité d'éléments en interaction[3]. En effet, de même que tout formalisme mathématique peut être morcelé et discrétisé, pourquoi ne pas considérer que tout objet de la physique, ce qui occupe les physiciens, est souvent assimilable à « une assemblée de points réellement infinie »[4] ? Généralisant cette suggestion qui lui vient au départ de problèmes non linéaires d'hydrodynamique[5], c'est ce qu'Ulam appelle un « modèle infini » ou un modèle à une infinité de degrés de liberté. Il considère de façon tout à fait remarquable que cela pourrait même être considéré comme « une nouvelle sorte d'idéalisation »[6] en physique. En effet, dans tout objet de la physique entrent des « paramètres cachés »[7]. Mais on a tendance à chercher soit à traiter les éléments localement, un par un et en les isolant, soit à les traiter en bloc mais de façon approximative et en ne se penchant que sur des valeurs moyennes supposées avoir un sens physique. Ce mot d'« idéalisation » paraît toutefois curieux ici : si l'on prend tout en considération dans le modèle, où réside l'idéalisation ?

Voici comment nous suggérons de comprendre son propos : on doit en fait interpréter cette idéalisation comme valant *en extension* et non plus *en compréhension*. C'est le sens même de l'introduction du modèle discrétisé et infini. Il s'agit d'une idéalisation par la multiplication et non par l'abréviation ou la condensation. Les éléments seront chacun idéalisés et simplifiés à l'extrême mais, en contrepartie, c'est leur nombre infini qui va travailler à former une représentation formelle judicieuse. Il s'agit donc d'une idéalisation distribuée à l'infini et qui se manifeste par une extériorisation intégrale des propriétés physiques, donc par une spatialisation en ce sens. Elle explicite les rapports cachés en les discrétisant, certes le plus souvent d'une façon non compréhensible car non synthétisée, ou plutôt non analytique en terme mathématique[8]. Mais, dans ce cadre, la procédure s'apparente à la méthode heuristique de Monte-Carlo et elle a justement un

---

[1] "One should remember that the distinction between a probabilistic and deterministic point of view lies often only in the interpretation and not in the mathematical treatment itself", [Ulam, S., 1952], p. 266.
[2] [Ulam, S., 1952], p. 266.
[3] [Ulam, S., 1952], p. 273.
[4] "actually infinite assemblies of points", [Ulam, S., 1952], p. 272.
[5] [Ulam, S., 1976, 1991], p. 196.
[6] "a new kind of idealization", [Ulam, S., 1952], p. 273.
[7] "hidden parameters", [Ulam, S., 1952], p. 273. Ulam fait bien sûr ici allusion aux avatars de la physique quantique. Il avait lui-même proposé une interprétation discrétisée et aléatoire de la résolution de l'équation de Schrödinger.
[8] Sur ce point, il faudrait sans doute rapprocher cette idéalisation extensionnelle causée par l'application de la méthode de Monte-Carlo de l'effet que produit la « théorie des catégories » (1945) de S. Eilenberg et S. Mac Lane, sur les concepts mathématiques antérieurs de l'algèbre et de la topologie. Le mathématicien René Lavendhomme parle lui aussi d'une catégorie comme d'une « définition extensionnelle et opératoire d'un concept mathématique », [Lavendhomme, R., 2001], p. 265. Nous reviendrons plus bas sur la « théorie des catégories » et sur son rôle dans l'histoire de la modélisation de la morphogenèse.

rôle majeur : elle consiste à explorer de façon déterministe ce système modèle infini en ne recourant qu'à des matrices de transformation de rang fini[1].

Et c'est précisément là qu'intervient l'exemple de la théorie des automates de von Neumann. Car le problème est pour Ulam directement analogue : il s'agit d'un très grand nombre d'éléments en interactions où un grand nombre de degrés de liberté demeurent. En outre, Ulam, partant de son modèle physique infini conçoit logiquement ces automates finis comme dispersés dans un espace infini. À la fin de l'article de 1952, il peut donc rappeler la formalisation spatialisée qu'avec von Neumann, il avait proposée dès 1951 :

« Un champ d'application intéressant pour des modèles consistant en un nombre infini d'éléments en interaction peut exister dans les théories récentes des automates [renvoi au cours que von Neumann a donné sur ce sujet en 1949 à l'université de l'Illinois]. Un modèle général considéré par von Neumann et l'auteur serait de la sorte :

Soit un treillis [« lattice *»] ou un graphe de points, chacun avec un nombre fini de connexions avec certains de ses voisins. Chaque point est capable d'avoir un nombre fini d''états'. Les états des voisins au temps t_n induisent, d'une manière spécifique, l'état du point considéré au temps t_{n+1}.Cette règle de transition est fixée de façon déterministe ou, plus généralement, peut impliquer des décisions partiellement 'aléatoires'.*

On peut maintenant définir des sous-systèmes finis et clos qui seront appelés automates ou organismes. Ils seront caractérisés par une séquence périodique ou presque périodique de leurs états qui sera fonction du temps et par la caractéristique 'spatiale' suivante : l'état des voisins de l''organisme' a seulement une 'faible' influence sur l'état des éléments de l'organisme ; l'organisme peut, au contraire, influencer dans toute sa généralité les états des points voisins qui ne font pas partie de l'organisme.

Un but de la théorie est d'établir l'existence de sous-systèmes qui sont capables de se multiplier, c'est-à-dire de créer au cours du temps des systèmes identiques ('congruents') à eux-mêmes. »[2]

Voilà donc le point précis où l'approche spatialisante d'Ulam, née explicitement à partir de 1946-1947, en rencontrant en 1951[3] les travaux antérieurs de von Neumann sur la théorie des automates reproducteurs, suggère aux deux mathématiciens d'interpréter l'*identité*, qui doit se manifester à un moment ou à un autre dans tout phénomène de reproduction, en terme de *congruence* ou de superposabilité, c'est-à-dire en des termes spatiaux.

---

[1] Voir les derniers mots de l'article de 1952, [Ulam, S., 1952], p. 274 : "Mathematically, the simplest versions of such schemes would consist simply of the study of iterates of infinite matrices, having non-zero elements in only a finite number of terms in each row. The problems consist of finding the properties of the finite submatrices appearing along the diagonal, as one iterates the matrix."

[2] "An interesting field of application for models consisting of an infinite number of interacting elements may exist in the recent theories of automata. A general model, considered by von Neumann and the author, would be of the following sort : Given is a infinite lattice or graph of points, each with a finite number of connections to certain of its 'neighbors'. Each point is capable of a finite number of 'states'. The states of the neighbors at time tn induce, in a specific manner, the state of the point at time tn+1. This rule of transition is fixed deterministically or, more generally, may involve partly 'random' decisions. One can define now closed finite subsystems to be called *automata* or *organisms*. They will be characterised by a periodic sequence of their states as function of time and by the following 'spatial' character : the state of the neighbors of the 'organism' has only a weak influence on the state of the elements of the organism ; the organism can, on the contrary, influence with full generality the states of the neighboring points which are not part of other organisms. One aim of the theory is to establish the existence of subsystems which are able to multiply, i.e., create in time other systems identical ('congruent') to themselves", [Ulam, S., 1952], pp. 273-274.

[3] [Wolfram, S., 2002], p. 876.

C'est donc sur un treillis supposé infini mais semblablement spatialisé qu'entre 1952 et 1953, von Neumann arrive finalement à représenter un automate reproducteur. Ce dernier est cependant complexe : chaque point du treillis porte une couleur sur les 29 possibles et les règles de transition de ces points sont assez compliquées et multiples. Chaque point n'interagit qu'avec ses quatre voisins. Von Neumann montre qu'il faut un « organisme » occupant environ 200000 points pour qu'il y ait à la fois un copieur universel et un contrôleur[1]. Mais von Neumann ne poursuit pas ses travaux en ce sens. Cherchant toujours à saisir l'essence davantage logique des phénomènes de reproduction biologique, il est déçu de n'avoir justement pu dissocier la logique du processus de la modélisation de sa matérialité[2]. Par la suite, en toute cohérence avec sa tentative de construire une théorie générale des automates, il cherchera donc à rendre de nouveau continue et abstractive cette modélisation discrétisée et spatialisée.

Spatialiser les formalismes en biologie : les « systèmes de réaction binaire »

De son côté, au cours des années 1950, Ulam poursuit notamment son travail d'information et de vulgarisation au sujet de son approche heuristique fondée sur la méthode de Monte-Carlo. Pendant cette décennie, il est clair que son intérêt pour les formalismes qui se prêtent particulièrement à une représentation spatiale au moyen de l'ordinateur s'accroît encore considérablement. C'est là que, en travaillant à montrer que l'ordinateur peut se prêter à des études heuristiques de questions mathématiques autrement insolubles, il voit de surcroît une possibilité de rejoindre une problématique biologique. En effet, en parallèle avec ses travaux de physique théorique, face à la récente et formidable réussite de Watson et Crick, et fasciné par la figure de George Gamow (1904-1968)[3], Ulam commence à s'intéresser sérieusement à des questions de biologie dans la mesure où elles semblent pouvoir s'exprimer conformément à son approche mathématique des phénomènes physiques[4].

Ainsi, dès 1954[5], il spécule d'abord de lui-même, puis en compagnie du mathématicien Paul R. Stein[6] et de la physicienne, spécialiste en programmation du MANIAC II, Mary T. Menzel[7], sur une étude mathématique du « taux d'évolution » dans une population à très grand nombre d'individus de N types différents, et dont les rencontres binaires (deux à deux) donneraient naissance à un nouvel individu appartenant à un de ces N types[8]. De façon générale, il s'agirait

---

[1] Voir [Burks, A. W., 1970], pp. 52-64 et [Heudin, J.-C., 1994], p. 41.

[2] [Goujon, P., 1994a], pp. 79 et 82.

[3] Dès 1953, ce physicien américain d'origine ukrainienne avait proposé à Watson et Crick d'interpréter en termes de codage en 20 acides aminés la structure de la molécule d'ADN. Pendant l'été 1954, Gamow s'était adjoint les compétences de Métropolis dans la manipulation du MANIAC comme des procédures de Monte-Carlo pour tester, par simulation, les différents types de codes possibles. On sait que cette intuition de Gamow fut essentiellement réfutée par les travaux ultérieurs sur l'ARN messager. Ulam a donc nécessairement eu vent de cette tentative retentissante et qui le touchait de près. Voir [Segal, J., 2003], pp. 479-480.

[4] Dans son témoignage, le philosophe et mathématicien David Hawkins rappellera un propos d'Ulam à qui l'on reprocha à la fin des années 1960 de ne pas bien connaître la biologie alors même qu'il se piquait de faire de la biologie théorique : « Ne demandez pas ce que les mathématiques peuvent faire pour la biologie, demandez plutôt ce que la biologie peut faire pour les mathématiques ! » ("Ask not what mathematics can do for biology, ask rather what biology can do for mathematics !", [Copper, N. G., 1987, 1989], p. 46).

[5] [Ulam, S., 1976, 1991], p. 203.

[6] Paul Stein était un physicien de formation et il avait été « converti » aux mathématiques, selon l'expression d'Ulam, par Ulam lui-même. Stein était arrivé à Los Alamos en 1950. Il était devenu un des plus proches collaborateurs d'Ulam à partir de 1953. Voir sur ce point [Ulam, S., 1976, 1991], p. 202 et [Cooper, N. G., 1987, 1989], p. 91.

[7] Voir, sur ce point, le témoignage de Paul Stein *in* [Cooper, N. G., 1987, 1989], p. 94.

[8] La motivation initialement biologique de ce travail mathématique sur les « transformations quadratiques » est clairement attestée dans le rapport de Los Alamos de 1959 intitulé "Quadratic Transformations Part I" et qu'Ulam a rédigé avec P. R. Stein et M. R. Menzel. Ce rapport a été publié en 1990 dans [Ulam, S., 1990], pp. 190-292. Voir *ibid.*, p. 191 : "The motivation for the considerations which follows lies in the combinatorial problems suggested by genetic or

donc de l'étude de relations de transformation de « plusieurs-à-un », « *many-to-one* ». En fait, Ulam, sans le dire explicitement, veut contrer ici l'approche par équations différentielles, alors classique, telle que le généticien des populations Sewall Wright (1889-1988) l'a développée et qu'il qualifie, en privé, de « pure sottise »[1]. Il est préférable pour lui de prôner une approche par itérations sur des individus représentés ponctuellement[2]. De fait, pour peu que l'on se donne un gaz avec N caractéristiques possibles pour ses particules et avec la possibilité pour ses particules d'entrer en collision en formant d'autres particules, l'analogie formelle entre le cas physique et la situation biologique semble toute trouvée. Ulam et ses collègues présentent le cas physique du gaz hypothétique comme une simplification et donc une généralisation du cas biologique[3]. Après avoir insisté sur ce point, dans le rapport de 1959, les auteurs s'intéressent à l'étude formelle de cette classe restreinte de transformations quadratiques qu'ils baptisent « systèmes de réactions binaires »[4].

Il est important de noter que le cas biologique représente une complication du cas traité jusqu'alors en hydrodynamique et en physique nucléaire : dans le cas de la diffusion-réaction des neutrons, on pouvait supposer que l'on n'avait pas affaire à une réaction binaire car les probabilités gouvernant la destinée d'un neutron pouvaient être supposées indépendantes de la destinée des neutrons coexistant dans la même génération (les laps de temps étant suffisamment courts). Dans le cas de la génétique des populations, la production d'une nouvelle génération est au contraire pleinement déterminée par des paires de particules. C'est cela qui nécessite d'étudier les itérations de transformations quadratiques et leurs convergences[5]. Cependant, de tels problèmes mathématiques sont, en général, non analytiquement solubles. C'est donc au moyen de calculs itérés, effectués d'abord sur un ordinateur IBM 704[6] puis sur un MANIAC II, que les auteurs du rapport de 1959 étudient empiriquement les comportements de convergence (en proportion) des différents types de particules ou individus biologiques. C'est-à-dire qu'ils « observent »[7] sur l'écran l'éventuelle stabilisation vers des comportements limites. Dans cette méthode, Ulam l'affirmera sans ambiguïté dans la seconde partie du rapport sur les transformations quadratiques écrite avec Stein en 1963, il faut « utiliser ses yeux »[8] !

Ce travail est poursuivi par la suite. Nous l'évoquerons ici dans sa forme simplifiée afin de montrer en quoi il a pu mener à la simulation de ramifications. En 1961, Ulam publie le chapitre d'un manuel de « Mathématiques modernes pour les ingénieurs »[9] où il n'ajoute que peu de considérations nouvelles par rapport à ses articles précédents en ce qui concerne la méthode de Monte-Carlo[10]. Mais il trouve l'approche proposée en 1959 suffisamment importante pour en offrir

---

biological systems. One has to deal with large populations of individuals (or particles) present in a given generation. Those may combine in pairs and produce, in the next generation, new particles." Mais, dans son témoignage de 1987, Paul Stein confirme que, même alors, la motivation principale d'Ulam reste d'élargir par là ses investigations sur les approches mathématiques et computationnelles à d'autres cas de processus évolutionnaires que ceux qu'il a rencontrés en physique nucléaire. Voir [Cooper, N. G., 1987, 1989], p. 92.

[1] Aux environs, de 1955, au sujet de la biologie mathématique, Ulam dira à Stein "It is all foolishness, don't you think ?" Voir [Cooper, N. G., 1987, 1989], p. 91.

[2] [Cooper, N. G., 1987, 1989], p. 92.

[3] Voir "Quadratic Transformations Part I" *in* [Ulam, S., 1990], p. 191.

[4] "Binary Reaction Sytems" *in* "Quadratic Transformations Part I", [Ulam, S., 1990], p. 191.

[5] [Ulam, S., 1961], p. 278.

[6] "Quadratic Transformations Part I" *in* [Ulam, S., 1990], p. 197.

[7] "Quadratic Transformations Part I" *in* [Ulam, S., 1990], p. 198 : "… letting the computer iterate the transformation in question 'as long as necessary', i.e., until some definite limiting behavior was *observed*." C'est nous qui soulignons.

[8] "use your eyes", *in* "Non-Linear Transformation Studies on Electronic Computers", with P. R. Stein, [Ulam, S., 1990], p. 303.

[9] [Ulam, S., 1961].

[10] [Metropolis, N. and Ulam, S., 1953] se concentre sur une propriété aléatoire propre à une fonction arithmétique. [Ulam, S., 1954] propose d'appliquer Monte-Carlo à des jeux tactiques. Voir [Galison, P., 1997], pp. 759-767, sur l'importance

déjà une version édulcorée aux ingénieurs. Ulam y présente explicitement cette approche « expérimentale » sur ordinateur de problèmes de génétique comme la généralisation de travaux numériques sur les transformations linéaires aux transformations quadratiques, non-linéaires donc, c'est-à-dire aux transformations représentables spatialement par un système de points, où les points changent d'état en fonction de l'état de *deux* de leurs voisins immédiats[1].

On peut donc se donner simplement trois types de particules (1,2,3) ; et les règles de génération peuvent être définies comme suit : $1 + 1 \rightarrow 1$; $1 + 2 \rightarrow 1$; $1 + 3 \rightarrow 2$; $2 + 2 \rightarrow 3$; $2 + 3 \rightarrow 3$; $3 + 3 \rightarrow 1$. Grâce à l'interprétation de l'évolution de ce « système de particules » en termes de transformations quadratiques, Ulam dispose d'une expression mathématique simple pour l'évolution pas à pas des proportions pour chaque type de particules. Elles s'expriment en effet ainsi :

$$X_1' = X_1^2 + X_3^2 + 2\,X_1X_2$$
$$X_2' = 2\,X_1X_3$$
$$X_3' = X_2^2 + 2\,X_2X_3$$

avec X_1, X_2, X_3 les proportions respectives en particules 1, 2, 3,
et X_1', X_2', X_3' ces mêmes proportions à la génération suivante.

On a donc bien affaire à une transformation quadratique. Mais comme de surcroît $X_1 + X_2 + X_3 = 1$ et $X_1' + X_2' + X_3' = 1$ également, il s'agit d'une transformation d'une aire triangulaire sur elle-même fait remarquer Ulam[2]. Avec Stein, ils ont étudié les 97 transformations possibles de ce style (et non équivalentes par permutation d'indice) pour ce cas où il y a trois types (ou « couleurs ») de particules[3].

On voit donc que si Ulam continue à spatialiser son formalisme pour étudier des systèmes à grand nombre d'éléments, en l'occurrence des systèmes de réactions binaires, ce qui l'intéresse entre 1959 et 1961, ce n'est *pas encore la forme elle-même* que génère le système de particules avec ses règles locales. S'il spatialise ses formalismes pour la biologie, ce n'est pas encore exactement pour s'intéresser à la forme spatiale résultante. Toutefois, à travers ce dernier travail dont nous avons rapporté ici les grandes lignes, on perçoit bien le moment où Ulam va s'intéresser au devenir de la forme pour elle-même. Il y a en effet cette importante remarque selon laquelle cette transformation quadratique itérée peut être en fait interprétée comme la transformation d'une surface triangulaire en elle-même[4].

Même si cela ne nous semble pas avoir été jusque là totalement perçu par les historiens qui ont relaté les origines des automates cellulaires ou de la vie artificielle, nous pensons que c'est ce dernier travail qui va assez naturellement conduire Ulam à son article de 1962 sur les « problèmes mathématiques en rapport avec la structure et la croissance des figures »[5]. Ainsi, dès le rapport de 1959 et dès ce chapitre d'ouvrage de 1961, il n'y a pas jusqu'à la forme géométrique

---

de la notion de « jeu » chez von Neumann et Ulam. Enfin [Pasta, J. R. and Ulam, S., 1959] porte sur l'application de la méthode heuristique de type Monte-Carlo à un problème d'hydrodynamique et recourt pour cela à la discrétisation afin de produire une représentation (par des '1' et des '2' imprimés au titre de signes distinctifs dans un tableau) de « particules virtuelles » en transition de phase, *ibid.*, pp. 8-9.

[1] [Ulam, S., 1961], pp. 278-279.

[2] [Ulam, S., 1961], p. 279.

[3] Voir également "Quadratic Transformations Part I" *in* [Ulam, S., 1990], p. 198.

[4] Si l'on apparente les proportions à des rapports d'angles (angle/180°) : $\alpha/180° + \beta/180° + \gamma/180° = 1$, on a bien le théorème selon lequel la somme des angles d'un triangle quelconque est égale à deux droits.

[5] [Ulam, S., 1962], p. 215.

triangulaire qui ne soit déjà évoquée comme une interprétation spatialisée de sa réflexion physico-mathématique sur les transformations quadratiques déterministes itérées, ces transformations ayant été elles-mêmes auparavant conçues comme reformulations déterministes et finitistes de processus stochastiques sur un espace infini. Il est donc possible de rapporter la naissance des automates cellulaires spatialisés à un cheminement de pensée faisant intervenir une problématique à la fois physique et mathématique, et tournant finalement toujours autour de la question de l'approche heuristique[1] des modèles hydrodynamiques ou de génétique des populations à nombre infini de particules. La mise en évidence de ce fait a le grand mérite de nous éviter d'interpréter l'article de 1962 comme surgi de nulle part, ou encore comme la seule et unique conséquence des expériences amusantes (par ailleurs incontestables[2]) qu'Ulam se permettait de mener sur son calculateur numérique à Los Alamos en cette fin des années 1950. Mais qu'en est-il exactement ?

Simulation spatialisée et déterministe de la croissance et de la ramification

En 1962, Ulam publie donc sa première véritable simulation numérique de la branchaison explicitement conçue comme analogue à une forme biologique ramifiée. Il se réfère pour cela à des travaux heuristiques qu'il a menés à Los Alamos avec ses collègues R. G. Schrandt et J. Holladay. Ce qui est nouveau dans cet article est principalement de deux ordres. Tout d'abord Ulam insiste sur le fait qu'il va se pencher sur des phénomènes de croissance et plus seulement de multiplication. Cet article relie donc explicitement l'étude des morphologies discrètes à la simulation de la morphogenèse. Ensuite, une grande importance est donnée à la représentation spatiale et géométrique des réactions d'interactions entre particules : le triangle encore abstrait de l'article de 1961 va donc se concrétiser du fait que la transformation itérée sur un ensemble de *sommets* de triangles donne lieu à un ensemble de *surfaces* triangulaires géométriquement dessinées sur l'écran de l'ordinateur et formant réseau ou treillis[3]. Puisqu'il n'y a pas le plus souvent de théorème sur le comportement asymptotique des proportions des particules dans des réactions binaires, les propriétés des sommets des triangles, qui incarnaient comme on s'en souvient les proportions des différents types de particules, vont être étudiées dans leur comportement asymptotique à travers le comportement des surfaces : il va s'agir donc d'*observer* empiriquement le comportement global (vis-à-vis de la symétrie, de la densité d'occupation du plan ou de l'espace…) de la multiplication de ces triangles en fonction de règles de génération et de grille initiale variables. C'est pour cela avant tout qu'Ulam fait dessiner des *triangles géométriquement concrets et figurés* sur l'écran ou oscilloscope [« *scope* »][4] qui est branché sur le calculateur numérique de Los Alamos. C'est là qu'Ulam achève donc son mouvement de spatialisation des formalismes et de leur traitement : par la représentation géométrique directe de triangles censés permettre l'étude de relations triangulaires, ou systèmes de réactions binaires,

[1] Comme en témoigne une fois encore la conclusion du chapitre de 1961, [Ulam, S., 1961], p. 275.
[2] Comme nous l'avons rappelé incidemment dans un note précédente, la notion de « jeu » ne cesse pas non plus de valoir comme une autre idée-force dans son approche de la physique mathématique.
[3] Voir [Ulam, S., 1962], p. 220. Les contraintes sur les types (ou couleurs) de sommet sont explicitement déplacées par Ulam sur de simples contraintes de nature géométrique valant sur les surfaces en croissance. Ulam interprète cela comme une simplification de la question des triangles : "We return now to our discussion of growing patterns where we do not label the new elements by different colors but *merely* consider, as in paragraph 2, the geometry of the growing structure", *ibid.*, p. 220. C'est nous qui soulignons. Les triangles ont dans un premier temps été itérés sur le treillis selon les règles s'appliquant à leurs sommets, ces sommets étant chacun d'un des trois différents types. Mais la simplification consiste à considérer les seules surfaces triangulaires dans leur présence ou leur absence sur les cases du treillis et non plus leurs sommets dans leur différents types.
[4] [Ulam, S., 1962], p. 221.

entre particules, il passe de la considération des sommets à celle des surfaces et donc à celle des figures et de leur croissance métrique effective. Ce faisant, il passe d'un intérêt pour la génétique des populations à un intérêt pour la morphogenèse des êtres vivants. Mais en quoi consiste cette spatialisation ultime ?

Un modèle d'accrétion

Comme nous l'avons rappelé, ce n'est pas Ulam qui a inventé l'expression « automate cellulaire » mais Arthur Burks. Ulam, quant à lui, parle de sa proposition comme d'un modèle « d'accrétions successives »[1]. Nous serons mieux à même de comprendre ce qui apparente cette simulation cellulaire ou « particulaire » géométrisée aux précédentes et ce qui l'en distingue, si nous en donnons une forme simplifiée :

Un « modèle d'accrétion » est défini par :

1) une grille où peuvent venir se positionner des cellules de formes géométriques simples,
2) le contenu initial de la grille avec un nombre initial fini de cellules et leurs positions initiales,
3) un ensemble de règles de naissance et de mort des cellules, règles valables sur une case quelconque, appliquées à chaque pas de temps (qui est discrétisé donc) et exprimées en fonction du voisinage immédiat de la case considérée.

À chaque top d'horloge, on fait appliquer les règles sur chaque case et la nouvelle grille devient le nouvel état initial. Ainsi on peut suivre des évolutions de phénomènes dans toute une portion d'espace simultanément. La différence essentielle entre ces automates et ceux de Turing est qu'ils s'inscrivent d'emblée dans une portion d'espace et qu'ils sont donc à même d'opérer *en parallèle*. Par ailleurs, cette modélisation utilise des règles de naissance cellulaire qui ne sont *pas probabilistes*. On comprend ici le rôle qu'a pu jouer chez Ulam le passage mathématiquement justifié aux transformations itérées et *déterministes*. La sensibilité au voisinage, quant à elle, vient du fait que ces triangles (ou rectangles[2]) doivent rendre compte de collisions entre particules, donc d'évolutions *en parallèle* et de rencontres effectives dans l'espace géométrique. Chaque cellule est donc un automate qui obéit à ses propres règles (d'où son « auto-nomie ») en fonction des données du voisinage. Les règles déterministes y sont appliquées sur toutes les portions de l'espace accessibles et cela à chaque top d'horloge.

À la différence du modèle de Turing, ces modèles permettent donc de simuler une croissance tous azimuts avec un grand nombre d'événements simultanés et répartis dans un environnement donné. Ces automates cellulaires peuvent par ailleurs sans difficulté être traités par ordinateur. C'est bien là qu'ils sont nés. Sur l'écran de l'appareil, on peut ainsi voir des motifs

[1] "successive accretions", [Ulam, S., 1962], p. 215.
[2] Mais, en 1962, Ulam montre que le treillis rectangulaire présente moins d'intérêt car on peut trouver des théorèmes sur son comportement asymptotique et, de plus, il ne modélise pas le problème de physique nucléaire de Stein et Ulam. Ce dernier a besoin d'être exprimé sous forme de relations « triangulaires ». Dans le rapport de Los Alamos de 1967, en revanche, dans la mesure où est davantage assumé le projet d'étudier pour eux-mêmes des objets géométriques définis par des formes élémentaires simples et par des règles récursives, Ulam et Schrandt étudient essentiellement des treillis rectangulaires. Voir "On Recursively Defined Geometrical Objects and Patterns of Growth", *in* [Ulam, S., 1990], pp. 379-197.

évoluer au fil du temps, des formes se stabiliser ou au contraire péricliter et disparaître, et cela pourtant sans l'intervention du hasard. Ulam parle même à plusieurs reprise de « comportement chaotique »[1]. Ce qui signifie seulement chez lui qu'on ne dispose pas des moyens analytiques (formulés mathématiquement et analytiquement) permettant de prévoir la proportion ou la densité de particules lorsque le temps va vers l'infini.

Ramification à partir d'une « pousse »

Dans l'article de 1962, Ulam imagine de surcroît qu'avec une règle bien choisie pour la naissance des cellules selon le voisinage, on peut également simuler la croissance d'une structure ramifiée. C'est donc la première fois qu'il simule la branchaison d'un arbre en simplifiant à l'extrême la grille et les règles. La grille est triangulaire : c'est précisément celle qui servait au traitement du problème des réactions nucléaires binaires. Et le point de départ est constitué d'une seule cellule positionnée sur la grille. La règle qu'il choisit impose de créer une cellule lorsqu'un et un seul côté de la case considérée se trouve en contact avec une case occupée. Si l'on considère qu'il s'agit d'une croissance végétale, la continuité spatiale est donc assurée. Et des ramifications, déjà assez réalistes du point de vue de la figuration, peuvent apparaître simultanément à des endroits différents sur la tige principale en train de se former. Ulam emploie même à dessein le terme de « tronc » ou « tige »[2] [« *stem* »] pour bien montrer l'analogie qu'il y a à faire. Le mot « génération »[3], sous sa plume, finit même par être écrit entre guillemets alors qu'auparavant, dans un pur contexte de physique nucléaire, Ulam l'utilisait sans cette précaution. C'est que, là aussi, il a clairement conscience que s'effectue un glissement conceptuel pour ces formalismes, d'une expression de problèmes valant en physique nucléaire à une expression de problèmes similaires mais valant en biologie de la forme. La notion de « croissance » elle-même a pris la place de celle, moins parlante, de « multiplication » car les résultats des générations précédentes ne sont pas effacés [« *erased* »] et servent de « tronc » commun aux nouvelles pousses.

Toujours est-il qu'Ulam travaille aussi et surtout, non pas à calibrer exactement ces « modèles d'accrétions » sur la réalité mais à essayer de donner « un aperçu sur la quantité d''information' nécessaire pour décrire les structures apparemment énormément élaborées des objets vivants »[4]. Autrement dit, il rejoint quand même le projet de von Neumann sur ce point : même si, pour ce faire, il spatialise ses formalismes, il cherche avant tout des comportements stables ou asymptotiques qui puissent donner lieu, au final, à des formulations théoriques synthétiques et en des termes interprétables à un niveau informationnel.

Bilan sur les premières simulations : un travail de mathématiciens

Ainsi, jusqu'à présent, l'histoire nous montre que ce sont surtout des mathématiciens et physico-mathématiciens qui proposèrent de nouveaux modèles théoriques de croissance des êtres vivants et des plantes. Et parmi ces derniers, ce sont tout spécialement des mathématiciens versés dans des problèmes concrets de calculabilité (comme Turing, von Neumann et Ulam), à la lisière entre le développement d'un nouvel objet technique et celui de ses usages : l'ordinateur.

[1] [Ulam, S., 1962], p. 220.
[2] [Ulam, S., 1962], p. 216.
[3] [Ulam, S., 1962], p. 215.
[4] "… to throw a sidelight on the question of how much 'information' is necessary to describe the seemingly enormously elaborate structures of living objects",[Ulam, S., 1962], p. 215.

Rétrospectivement, on peut donc comprendre que les réflexions sur la calculabilité en mathématique et en physique ont mené à un nouveau type de formalisation susceptible, par des moyens techniques réalisables et déjà réalisés (puisque l'ENIAC existait déjà avant que la méthode de Monte-Carlo ne soit proposée), de servir à la formalisation (au moins en théorie) de phénomènes jusque là rebelles à la formalisation. La morphogenèse en est une illustration privilégiée.

Toutefois, jusqu'à présent, nous avons vu la simulation davantage se développer dans un contexte où une alternative aux formalismes différentiels est explicitement cherchée et trouvée. Dès lors, l'accent est finalement mis sur le caractère déterministe des règles affectant les cellules du treillis : la représentation d'Ulam est une simulation dans la mesure où elle intègre de façon décisive et prioritaire le caractère spatial des phénomènes simulés. Et c'est en quoi les formalismes, se physicalisant et se spatialisant, se prêtent mieux à une représentation des phénomènes spatialisés. La spatialisation du formalisme permet une formalisation de la spatialité. Et c'est finalement la raison ultime pour laquelle Ulam, partant d'une problématique de calculabilité dans des équations aux dérivées partielles, a été un précurseur en ce domaine.

Mais, sensiblement à la même époque, il est un autre contexte scientifique majeur dans lequel une simulation de la morphogenèse va voir le jour. Il s'agit du milieu, alors en plein essor, de la reconnaissance automatisée de l'écriture manuscrite et, plus largement, des formes. Or, c'est là qu'un certain lien avec les modèles statistiques sera en revanche explicitement assumé. En fait, en 1962, Ulam en vient à *synthétiser* des formes au moyen de règles déterministes. Mais auparavant, en 1960, le calculateur numérique servait déjà aussi de support technique d'analyse statistique de données. À ce titre, l'ordinateur semble tout désigné pour servir aussi à la reconstitution du modèle statistique en un scénario probabiliste. À côté d'une simulation logiciste, discrète et déterministe de la forme, née dans une problématique computationnelle, se développe donc une simulation probabiliste, née pour sa part dans un contexte d'analyse et de reconnaissance de formes, c'est-à-dire de discrimination quantitative de formes qualitativement différentes. Or, même en 1962, Ulam ne semble pas avoir connu les travaux de Murray Eden dont il va être question maintenant. Remarquons sur ce point qu'un tel cloisonnement entre des approches voisines mais formulées par des chercheurs d'horizons différents confirme tout à la fois l'état juvénile de la représentation mathématique de la morphogenèse à la fin de ces années 1960, mais aussi l'origine essentiellement interdisciplinaire de la simulation morphogénétique sur ordinateur. Cela témoigne enfin de l'existence d'une certaine dispersion comme d'une communauté d'intérêt, d'un certain « esprit du temps » donc, dans l'évolution de la modélisation mathématique des formes à cette époque.

CHAPITRE 10 – La simulation conçue comme génératrice de forme au hasard

Dans ce chapitre, se confirmera encore l'idée que l'application qu'a fait Turing du modèle de diffusion sur un calculateur numérique a davantage contribué à la destitution des mathématiques du continu dans les sciences mathématisées des formes qu'on ne le croit d'ordinaire. Turing projetait en effet de donner une suite à sa publication de1952, notamment en insistant sur la modélisation de la mise en place des branches, la phyllotaxie. Mais ces recherches ne furent pas publiées et elles furent interrompues par son suicide en 1954. Or, nous pouvons remarquer que peu de chercheurs reprirent les travaux de 1952 avant les années 1960. Comprendre cette discontinuité dans les recherches morphologiques, c'est probablement apercevoir que l'article de Turing donnait en fait lieu à autant d'impasses effectives que de perspectives dignes d'espoir dans la modélisation de la morphogenèse. Quelles étaient-elles ? Ce fut le premier mérite de Murray Eden de les mettre explicitement en lumière.

En terminant son article, Turing avait en fait mis le doigt sur un écueil majeur de l'approche continuiste : la complexité des calculs et en particulier la non-linéarité des équations. L'hypothèse de la modélisation par transports et réactions chimiques imposait ainsi l'écriture de lois déjà très simplifiées : il fallait supposer que les taux de réaction étaient des fonctions linéaires des concentrations des substances. Les fonctions résultats n'étaient le plus souvent pas explicitables mathématiquement. L'usage de l'ordinateur comme calculateur avait bien mis en évidence les limites du langage des mathématiques du continu. Mais Turing n'en avait pas tiré l'idée qu'on pouvait s'écarter dès le départ du formalisme continuiste. C'est à Murray Eden qu'il revint de partir nommément de la suggestion de Turing et de réévaluer cette approche continuiste et déterministe en morphogenèse en lui opposant un autre mode de modélisation où l'ordinateur devint, par là même, là aussi véritablement un simulateur. Les premières simulations numériques *et* stochastiques de la croissance cellulaire sont ainsi effectuées par Murray Eden entre 1957 et 1960[1], au laboratoire Lincoln du MIT. Mais qui est Eden et dans quel contexte travaille-t-il ? Comment est-il conduit à ces simulations de croissance et de morphogenèse ?

Un « modèle probabiliste » de ramification

À la fin des années 1950, Murray Eden est jeune ingénieur en électricité et spécialiste en traitement du signal appliqué à la conception des calculateurs numériques. Ses spécialités initiales sont donc à la fois l'électricité, l'électronique et spécifiquement les *computer sciences* naissantes, mais aussi le formalisme propre aux théoriciens du signal depuis les travaux de R. Hartley et C. Shannon[2] : les probabilités. Il travaille pourtant encore au *Department of Electrical Engineering* du MIT lorsqu'il publie en 1958 et en 1960 deux articles sur la modélisation de la morphogenèse induite par la multiplication cellulaire, de même qu'un ensemble de travaux, qu'il poursuivra par la suite, sur la reconnaissance de l'écriture manuscrite. Il faut donc nous interroger sur cette inflexion *a priori* surprenante vers la biologie et la psycholinguistique. Dans quel esprit, dans quel contexte

[1] [Eden, M., 1960].
[2] Voir le chapitre de G. Darmois et D. Dugué *in* [Taton, R., 1964, 1995], pp. 96-97.

et sur quel objet produit-il ses premières recherches ? De quel matériel dispose-t-il alors ? Qu'est-ce qui l'amène finalement à la modélisation des formes biologiques et linguistiques ?

Auparavant, Eden a en effet publié dans la revue *Information and Control* un certain nombre de travaux sur la conception, le fonctionnement et les usages des calculateurs numériques, notamment une note sur la détection d'erreur dans les calculateurs logiques bruités. Initialement, il utilise donc les probabilités dans une perspective de théoricien du signal, et cela afin d'améliorer spécifiquement la fiabilité des calculateurs numériques à la conception desquels il participe. Cette spécialité ne lui sera d'ailleurs pas contestée puisque, par la suite, il deviendra professeur d'ingénierie électrique au MIT et il ne quittera ce poste d'enseignement qu'à sa retraite, où il deviendra professeur émérite.

Cette approche d'analyse des signaux, déjà répandue à l'époque, s'appuie sur l'estimation des paramètres de modèles probabilistes. Ce peut être par exemple des modèles de bruit dans les transmissions ou dans les composants électroniques. Elle se distingue donc d'une analyse statistique des phénomènes complexes en ce qu'elle est fondamentalement axée sur l'identification des paramètres de lois de probabilité complexes et dont la forme est intuitionnée et imposée *a priori*. Même si elles ont des sources communes, ces lois de probabilité peuvent n'avoir que très peu de points communs avec celles que se proposait R. A. Fisher dans sa méthode des plans d'expérience. Dans cette approche mathématique, les modèles probabilistes synthétisent le signal pour l'analyser. Car modéliser un bruit aléatoire exige en outre de se rapprocher des formalismes de la mécanique statistique et de la physique nucléaire puisqu'on y a affaire à des suites de variables aléatoires discrètes comme dans les processus de Poisson. Les théorèmes récents sur l'ergodicité proposés par Birkhoff[1] puis von Neumann[2] y ont ainsi un rôle décisif. Rappelons enfin qu'entre les années 1930 et 1950, les mathématiciens dédiés à l'analyse des signaux ont considérablement renforcé l'arsenal des théorèmes susceptibles de servir à l'estimation statistique de ces paramètres, notamment en ce qui concerne les lois de probabilités conditionnelles. Les définitions de Borel et l'axiomatique de Kolmogorov ont donné un langage plus sûr à la notion d'abord intuitive de probabilité en conférant en même temps une armature suffisamment rigoureuse pour déduire un certain nombre de résultats généraux (la loi des grands nombres, les diverses convergences en loi, le théorème de la limite centrale par exemple[3]) directement applicables aux sciences de la conception que sont les sciences de l'électronique et des calculateurs.

Or, la technologie à laquelle il travaille se stabilisant et rencontrant une certaine réussite, il se trouve que Murray Eden passe progressivement de la modélisation *de* calculateur à la modélisation *sur* calculateur. Le calculateur n'est plus pour lui un objet d'étude en soi, il devient un instrument stabilisé ouvrant à de nouvelles investigations. Or, cette ouverture n'est réellement possible qu'eu égard au contexte très particulier de son laboratoire de rattachement. L'environnement technique dont il bénéficie est en effet assez unique pour l'époque.

[1] Voir [Brouaye, F., 1990], pp. 97-98 et M. Janet *in* [Taton, R., 1964, 1995], p. 59.
[2] [Neumann (von), J., 1932a] et [Von Neuman, J., 1932b].
[3] Voir [Brouaye, F., 1990], pp. 51-66.

Le contexte technique du *Lincoln Laboratory*

Le laboratoire Lincoln a été initialement fondé en 1951 pour servir au traitement informatique des données du programme militaire SAGE[1]. Les recherches y sont donc essentiellement financées par l'armée américaine. On y retrouve l'*U.S. Army* (*Signal Corps*), l'*U.S. Navy* (*Office of Naval Research*) et l'*U.S. Air Force* (*Office of Scientific Research, Air Research and Development Command*). Mais progressivement, ces activités se sont étendues et diversifiées. À la fin des années 1950, Murray Eden peut y bénéficier ainsi d'un ordinateur hautement avancé pour l'époque[2], le TX-2, qui avait été développé dans ce même laboratoire du MIT, principalement sur des crédits de la *Navy*. Mais c'est bien sa fiabilité particulière[3] qui caractérise le TX-2. Il n'innove pas considérablement sur les générations précédentes en matière d'architecture, mais sa construction a été soignée à tous les niveaux de façon à sécuriser son utilisation : cet ordinateur peut ainsi être dédié à des applications diverses allant au-delà d'une simple exploration de la technologie informatique et de ses limites. La programmation ne s'est pas complexifiée par rapport aux machines précédentes dans la mesure où la structure matérielle n'a pas été révolutionnée, contrairement aux projets concurrents de l'époque. Une utilisation « normalisée » et facilitée y devient donc possible à destination des autres secteurs de la science. Ainsi, en proposant cet instrument à diverses équipes, le laboratoire Lincoln encourage-t-il depuis déjà quelques années les recherches en biologie, biomédecine et psychologie à utiliser l'outil informatique.

Dans la même perspective de rendre le calculateur plus accessible aux profanes en électronique, le MIT, conçoit, à la même époque, le projet de faire que les utilisateurs accèdent en temps partagé à un gros calculateur commun. C'est le projet MAC (*Modular Accounting Calculator*). Mais de son côté, le laboratoire Lincoln se rebelle contre une telle doctrine émanant de l'administration centrale du MIT. Cette forme de sécession doctrinale est de fait facilitée par la situation géographique du laboratoire Lincoln. Situé à 15km du campus central du MIT, à Lexington, il se trouve fortement excentré. De plus son financement est largement couvert par des crédits militaires indépendants. Au début des années 1960, un des concepteurs historiques du TX-2, Wesley Clarck, continue donc à y travailler dans l'idée que le temps partagé n'est pas la seule solution pour rapprocher la machine de l'utilisateur si l'on veut qu'il ne s'en effraie plus autant qu'auparavant[4]. Pour Clarck, le fait de posséder physiquement la machine dans son laboratoire propre, de l'avoir toujours sous la main, est un facteur de poids dans l'appropriation qu'on attendait de la part des biologistes et des psychologues. Selon lui, « un calculateur ne devrait être qu'un autre morceau de l'équipement de laboratoire »[5]. Ainsi, le laboratoire Lincoln a été parmi les premiers laboratoires à essayer de développer un usage des calculateurs plus convivial et plus proche de l'utilisateur, afin que les heures de programmation ne soient pas perdues ni non plus les crédits des laboratoires[6]. Par la suite, à partir de 1962, le laboratoire concevra des miniordinateurs conviviaux et destinés à la recherche biomédicale[7]. Ce sera la conception du LINC.

---

[1] *Semi-Automatic Ground Environment*. C'est un système de surveillance mis en place aux Etats-Unis à partir de 1953 et qui contrôlait les intrusions aériennes. Voir [Rammuni, G., 1989], pp. 120-121.
[2] Voir [NIH, 2000], p. 2.
[3] Voir [Ramunni, G., 1989], p. 157.
[4] [NIH, 2000], p. 2.
[5] [NIH, 2000], p. 2.
[6] À titre indicatif, S. A. Rosenfeld rappelle qu'au début des années 1960, une heure de calcul en temps partagé sur l'IBM 7090 revenait à environ 100$ pour l'utilisateur, [NIH, 2000], p. 1.
[7] [NIH, 2000], p. 2.

Le *Research Laboratory of Electronics* et le « Groupe de Traitement de l'Information Cognitive » du MIT

Au début des années 1960, dans le cadre du « Groupe de Traitement de l'Information Cognitive » du laboratoire Lincoln, Murray Eden va se trouver par ailleurs aux côtés du théoricien des circuits, Samuel J. Mason. Dans sa thèse de 1952, ce dernier avait auparavant introduit une méthode d'analyse des circuits électroniques par le biais de « graphes de flux de signal » [« *signal flow graphs* »]. Un des problèmes que pose l'analyse du comportement des circuits électroniques est que leur traitement mathématique direct donne lieu à un grand nombre d'équations simultanées et couplées. L'idée de Mason avait donc été de subdiviser le circuit en sous-systèmes et de leur associer des diagrammes de flux. On pouvait alors passer d'une représentation dans le domaine temporel à une représentation dans le domaine fréquentiel où l'analyse et la combinaison en transformées de Fourier est mathématiquement plus simple à exprimer et à résoudre, au besoin avec des modèles probabilistes. C'est donc une approche empirique, probabiliste et de dissection pragmatique des phénomènes artificiels complexes tels que les circuits électroniques qui caractérisait l'approche de Mason.

Mais, à la fin des années 1950, Mason comme Eden se trouvent face à un « instrument de laboratoire » désormais finalisé qui est le TX-2. Et, l'un comme l'autre, essentiellement dans le cadre des projets militaires de reconnaissance d'écriture et de traduction automatique, mais aussi sans doute en partie sous l'impulsion des idées humanistes revendiquées par Mason, ils infléchissent leurs travaux vers les *usages* de ce genre de machine, sans oublier pour autant leurs attaches en théorie du signal et en théorie des circuits. Ils développent en effet l'idée de produire une machine à destination des aveugles[1] qui, couplée à un synthétiseur vocal, soit au préalable à même de lire et de reconnaître des textes écrits. Ils décident de se concentrer sur l'amont de cette machine (la partie reconnaissance de formes), puisque des synthétiseurs vocaux assez performants existent déjà et sont améliorés par d'autres équipes, et de fonder le « Groupe de Traitement de l'Information Cognitive ». Ce sera chose faite en 1961. À cette date, et de son côté, Eden réfléchit depuis déjà deux ans à la conception d'une machine assistée par calculateur numérique et qui soit à même de reconnaître toutes les écritures, même manuscrites, quelles que soient les déviances relatives de leurs formes.

La rencontre féconde avec l'analyse phonologique structurale

En 1959 en effet, avec la collaboration d'un collègue du MIT, le linguiste Morris Halle, Murray Eden se lance dans ce qu'il appelle significativement la « caractérisation de l'écriture manuscrite »[2]. Morris Halle est alors en poste au « Département des Langues Modernes » du MIT. Il est à ce moment-là un collègue et prolongateur des travaux du célèbre linguiste d'origine russe Roman Jakobson. Depuis 1949, en effet, Roman Jakobson enseigne la langue et la littérature slaves à l'Université de Harvard. Mais depuis 1957, il est également chargé d'enseignement dans ce même département du MIT[3]. C'est là qu'il rencontre et collabore étroitement avec Halle. Au cours de ce que le linguiste et historien de la linguistique Georges Mounin appelle cette période de

[1] Selon un historien officiel du MIT, Paul Penfield Jr., Samuel J. Mason était un homme très affable et doué d'un très fort sens de la compassion. Il appartenait ainsi à plusieurs sociétés d'aide et de charité. Voir [Penfield, P., 2000].
[2] [Eden, M. et Halle, M., 1960].
[3] Pour ces indications biographiques, voir [Mounin, G., 1972], p. 139.

la « seconde phonologie jakobsonienne »[1], ils publieront ensemble un certain nombre de travaux décisifs. Sans revenir ici sur la carrière et la production intellectuelle riche et diversifiée de Jakobson, il est toutefois indispensable de rappeler que, dans les années 1920-1930, cet ancien membre du cercle linguistique de Prague avait contribué, aux côtés du linguiste russe N. Troubetskoï, à définir rigoureusement la phonologie comme « une phonétique fonctionnelle »[2], c'est-à-dire comme un système phonétique formel remplissant une fonction pour la communication humaine. Cette idée, en germe dès 1926, lui était restée mais elle avait subi des avatars sous l'effet de l'opportunisme mais aussi de la curiosité intellectuelle qui semblaient le caractériser[3]. Ainsi, se penchant sur l'analyse acoustique du langage, il n'avait jamais abandonné le projet de découvrir une table de Mendeleïev des éléments phoniques universels[4]. Systématisant l'intuition de Saussure (la langue comme système de différences), il conçoit, avec Troubetskoï, l'idée d'un ensemble d'oppositions phonologiques qui serait comme la liste des règles élémentaires et *a priori* servant à construire toutes les combinaisons phoniques possibles des langages humains.

Toutefois, et c'est là qu'intervient le combat qu'il mène avec Morris Halle contre les thèses contemporaines du linguiste Louis Hjelmslev, il ne s'agit pas, selon lui, de penser le phonème[5] comme une forme désincarnée, comme une forme sans substance. Du point de vue de la phonologie, on ne peut « entreprendre de réduire le langage à ses invariants ultimes, au moyen d'une simple analyse de leur distribution dans le texte et sans référence à leurs corrélats empiriques »[6]. Jakobson repousse donc vigoureusement le travers algébriste et axiomatiste que Hjelmslev manifeste à cette époque. Ce dernier était en effet convaincu, notamment depuis les travaux de R. Carnap sur la *Syntaxe logique de la langue* (1934), que le système des phonèmes pourrait être un jour réduit à un système d'axiomes irréductibles et combinables *in abstracto*. Or, grâce à la souplesse de la notion pragoise de traits distinctifs, Jakobson et Halle avaient montré que des traits distinctifs nouveaux et non déductibles *a priori* se manifestaient empiriquement dans tout système phonologique[7]. La morphologie phonologique ne pouvaient donc, selon eux, se fonder sur une axiomatique à la manière d'une algèbre[8]. À cet égard, Jakobson, sans renier ses

---

[1] [Mounin, G., 1972], p. 143.

[2] [Mounin, G., 1972], p. 105.

[3] Jakobson est « l'homme des curiosités pluridisciplinaires, des explorations pleines de risques, des constructions provisoires… », [Mounin, G., 1972], p. 141. Rappelons que, dans sa période américaine, sa théorie des six fonctions du langage lui était directement venue du formalisme de la théorie de la communication de Shannon : fonction de référence (centrée sur le référent), fonction expressive (centrée sur l'émetteur), fonction conative (centrée sur le récepteur), fonction phatique (centrée sur le canal), fonction métalinguistique (centrée sur le code), fonction poétique (centrée sur la forme du message). Voir [Jakobson, R., 1963], pp. 87-99 et [Mounin, G., 1972], pp. 147-148.

[4] [Mounin, G., 1972], p. 144.

[5] Selon Jakobson, le phonème (terme dû au linguiste polonais Baudouin de Courtenay) est une unité constituante des morphèmes (ou mots). Il est lui-même un composé de traits distinctifs phoniques appartenant à des oppositions fondamentales comme grave-aigu, tendu-lâche, voisé-non voisé... Ces traits distinctifs en tant qu'ils sont vocalisables concrètement par la voix incarnent le véritable système d'oppositions sur quoi la langue fonde son unité synchronique.

[6] [Jakobson, R. et Halle, M., 1956, 1963], p. 115.

[7] Ce sont les « traits configuratifs signalant la division de l'énoncé en unités grammaticales de différents degrés de complexité », les « traits expressifs mettant une emphase relative sur différentes parties de l'énoncé […] et suggérant les attitudes émotionnelles de l'énonciateur » et « les traits redondants aidant à l'identification d'un trait (ou d'une combinaison de traits) adjacent ou simultané, soit distinctif, soit configuratif », [Jakobson, R. et Halle, M., 1956, 1963], p. 109.

[8] Comme nous l'avons vu, suivant en cela Troubetskoï, ils veulent bien croire à une *systématicité* intégrale du type de celle que présente le tableau périodique des éléments mais pas à une *déductibilité* intégrale, désincarnée, et monolithique du type de celle que présentent les axiomatiques mathématiques. L'opposition entre le renvoi au modèle du tableau des éléments chimiques et le renvoi au modèle des axiomatiques est donc ici très significative. Une fois de plus, ici, comme naguère en biophysique, le renvoi à des modèles de formalisation produits ailleurs, en l'occurrence dans des sciences de la nature, sert à cristalliser et à exprimer une prise de position tant sur l'objet que sur les méthodes de la linguistique structurale. Le renvoi au tableau de Mendeleïev manifeste la volonté de conserver une place à la complexité et au caractère non totalement déductible du réel empirique à partir du possible axiomatisé, à partir de ce que Granger appellera le virtuel [Granger, G.-G., 1995], p. 231. La simulation par calculateur bénéficiera de cette idée

attaches structuralistes, noue des liens sur le tard avec le positivisme et le mécanicisme de la linguistique descriptive américaine de Leonard Bloomfield[1] mais sans renoncer à son idée d'une interpénétration de la forme et de la substance phoniques. En ce sens il n'adhère aucunement au béhaviorisme de Bloomfield. Car depuis lors, une technologie nouvelle semble permettre d'incarner des modèles de restitution phonologique sans pour autant brader l'aspect systémique et formel de la construction phonétique[2]. Cette technologie, c'est, pour Jakobson, le calculateur numérique. Et là est finalement la raison principale de la rencontre de Halle avec les techniques de reconnaissance de forme assistées par ordinateur et donc avec Eden.

Un modèle discret des « traits de plume » pour la forme des lettres manuscrites

Morris Halle se penche en effet lui aussi sur l'analyse de l'écriture manuscrite. Mais, comme Eden avec ses modèles probabilistes, il se trouve d'accord pour concevoir cette tâche analytique, ou de reconnaissance de formes, avant tout comme un travail d'identification d'un modèle de construction d'écriture à base dichotomique. D'où le terme « caractérisation » qui paraît dans le titre de leur article commun. En cela, ils s'opposent vigoureusement au travail contemporain de deux autres chercheurs (J. P. Thüring et J. Denier van der Gon) qui, dans une approche béhavioriste inspirée par l'école de Bloomfield, « simulent » le geste humain de l'écriture par un appareil entièrement analogique « incarnant une simple description d'une théorie concernant les forces musculaires impliquées »[3]. À l'inverse, ils voudraient que leur propre modèle soit universel et fondé sur des éléments atomiques, discrets donc, et mutuellement combinables, cela dans l'esprit même du formalisme russe qu'Halle avait hérité des travaux de Troubetskoï et Jakobson. En effet, discrétiser et formaliser le geste humain de l'écriture, c'est, pour Halle et Eden, se donner les moyens de rendre compte de ce qui se passe réellement dans ce phénomène : il s'agit d'un comportement humain à part entière, où il y entre donc un feedback cognitif, c'est-à-dire un effet de contrôle en retour constant par le cerveau de ce qu'il commande. En dernière analyse, ce feedback porte sur le *sens* de ce qui est en train de s'écrire, atome par atome d'expression[4]. En décidant de discrétiser la représentation de l'écriture humaine, on la modélise donc aussi comme un phénomène psychologique, spécifiquement humain, car on ne se focalise pas seulement sur l'intensité physique du phénomène et ses variations continues et insignifiantes au niveau musculaire.

À la même époque, dans une même perspective psycholinguistique, Jakobson rappelle d'ailleurs avec force le caractère discret des éléments du langage humain écrit. Selon lui, ce caractère y est encore plus évident que pour le langage oral[5]. Il a, sur ce point, entièrement pris

---

d'une complexité irréductible à une algèbre. Selon nous, elle est de ce point de vue très nettement du côté du réel et non du virtuel au sens de Granger. La simulation dévirtualise les mathématiques. Elle désuniversalise la *Mathesis Universalis*.

[1] Voir les analyses de [Robins, R. H., 1967, 1976], p. 218 et [Mounin, G., 1972], pp. 115-116.

[2] Le linguiste et historien de la linguistique R.H. Robins rappelle que Alexander Melville Bell (1819-1905) (père d'Alexander Graham Bell (1847-1922), l'« inventeur » du téléphone) avait créé un système de « parole visible » [« *visible speech* »], « où chaque processus d'articulation séparé reçoit sa propre notation graphique », [Robins, R. H., 1967, 1976], p. 211.

[3] "We have recently been informed about the work of Van der Gon and Thüring […] in simulating handwritten words written at high speed by an analogue device which embodies a simple physical description of a theory concerning the muscular forces used in writing", [Eden, M. et Halle, M., 1960], p. 293.

[4] [Eden, M. et Halle, M., 1960], p. 293.

[5] [Jakobson, R., 1963], p. 87.

acte des suggestions de Wiener[1] et de Shannon eux-mêmes. Mais il considère de surcroît qu'avec lui et ses collègues, « l'analyse linguistique est arrivée à résoudre le discours oral en une série finie d'unités d'information élémentaires »[2]. Il ajoute : « Ces unités discrètes ultimes, dites traits distinctifs, sont groupées en 'faisceaux' simultanés, appelés phonèmes, qui à leur tour s'enchaînent pour former des séquences. » Et il conclut enfin : « Ainsi donc, la forme dans le langage, a une structure manifestement granulaire et est susceptible d'une description quantique. »[3] Comme on le voit, les termes qu'il emploie ici sont choisis à dessein, afin de rapporter la linguistique, et plus spécifiquement, la phonologie aux sciences de l'ingénieur mais aussi aux sciences de la nature qui lui sont contemporaines[4].

Il est un fait que Halle et Eden suivent une perspective tout à fait analogue à celle que préconise Jakobson lorsqu'à ce moment-là, et dans la perspective plus concrète de concevoir une machine qui saurait déchiffrer les textes manuscrits, ils travaillent à découper la forme générale de chaque lettre manuscrite en une séquence linéaire de « traits de plume » [« *strokes* »]. Ces « traits de plume » élémentaires, comme les unités phonologiques de Jakobson se trouvent être en nombre fini : on en trouve 18[5]. Ils sont comme l'alphabet élémentaire de l'écriture de chaque lettre latine elle-même, de sa morphogenèse. Les lettres manuscrites ont donc leur alphabet granulaire. C'est bien là une façon de rapporter une forme humaine ou plutôt, une forme produite par un comportement humain, un geste qui est pour cela souvent considéré comme du qualitatif singulier, à de l'universel formel. Mais cet universel est parcellaire, granulaire. La lettre 'a' manuscrite par exemple est disséquée, atomisée en une séquence orientée de 5 des 18 « traits de plume » élémentaires, et cela quelle que soit la personne qui l'ait écrite. Ainsi en est-il de toutes les autres lettres.

Ensuite, puisqu'il s'agit à terme de reconnaître des mots, un mot manuscrit est considéré comme une séquence (de deuxième niveau donc) de ces séquences élémentaires de « traits de plume » que sont les lettres. Ils distinguent également des règles formelles contraignant la forme graphique totale des séquences possibles de ces lettres ou séquences élémentaires, dans la mesure où l'on considère qu'une écriture manuscrite est une écriture dans laquelle on ne lève pas le crayon pour passer à la lettre suivante. C'est-à-dire qu'un 'i' manuscrit écrit après un 'a' manuscrit ne se verra pas ajouter le même « trait de plume » de transition que le 'i' qui précède un 'm' par exemple[6]. Enfin, et cela est révélateur d'une approche modélisatrice de type probabiliste et discrétisée, pour tester leur modèle Eden et Halle font dessiner par le calculateur sur une table traçante un mot manuscrit réaliste comme « *knife* » (couteau en anglais). Il connecte ainsi le modèle discret et formel à un « générateur de courbes physiques »[7]. Et ils font déterminer aléatoirement (en conformité avec une loi de probabilité à valeurs sur le plan d'écriture de la table traçante et incarnant la présence d'un gradient orientant globalement la direction préférentielle du mot et donc des lettres le composant) par le calculateur le point final de chaque « traits de plume » dans chacune des lettres du mot. Le but de cette insertion de l'aléa dans le discret est de faire en

---

[1] [Jakobson, R., 1963], p. 87 : « Pour Norbert Wiener, 'il n'existe aucune opposition fondamentale entre les problèmes que rencontrent nos ingénieurs dans la mesure de la communication et les problèmes de nos philologues ' » [référence citée : Journal of the Acoustical Society of America (JASA), vol. 22 (1950), p. 697] ».
[2] [Jakobson, R., 1963], p. 87.
[3] [Jakobson, R., 1963], pp. 87-88.
[4] Pour confirmer la profonde et ancienne proximité des problématiques de la linguistique structurale et de l'analyse mathématique, il rappelle que le linguiste russe, B. Tomchevsky, avait, dès 1923, utilisé des chaînes de Markov pour l'analyse statistique des vers poétiques, [Jakobson, R., 1963], p. 99. Il interprète cela comme un premier rapprochement de la linguistique avec les formalismes des processus stochastiques, bien avant la suggestion de Wiener.
[5] [Eden, M. et Halle, M., 1960], p. 289.
[6] [Eden, M. et Halle, M., 1960], pp. 290-292.
[7] "generators of the physical curves", [Eden, M. et Halle, M., 1960], p. 293.

sorte qu'il y ait certaines dérives stochastiques dans l'enchaînement des lettres rendant compte du caractère non mécanique du geste humain modélisé.

Ainsi donc une forme produite par un geste humain, subissant de fortes variations supposées aléatoires, est modélisée sur l'instigation d'une théorie granulaire, mais non point axiomatique, de la phonologie structurale. Il s'agit bien en fin de compte d'un modèle de morphogenèse, puisqu'on y voit la genèse d'une forme[1] obéissant à des règles de branchement assorties d'une discrétisation préalable. Il n'en fallait pas plus, semble-t-il, pour donner à Eden l'idée de se pencher sur les formes biologiques avec des modèles tout à la fois discrets, stochastiques et assistés par un calculateur numérique.

Simulation probabiliste de la croissance d'un tissu dissymétrique

Mais, tout d'abord en décidant de s'attaquer aventureusement au problème de la morphogenèse du substrat biologique, pourquoi Eden pense-t-il faire une suggestion judicieuse auprès des embryologistes et des biologistes en général ? Qu'est-ce qui justifie cette incursion solitaire surprenante de la part d'un spécialiste en ingénierie électrique dans le domaine de la biologie des formes ?

Il faut bien sûr insister sur le rôle d'incitation qu'a joué ici le contexte du *Research Laboratory of Electronics*. Fidèle à une certaine pratique de recherches croisées, assez répandue au MIT, ce laboratoire est particulièrement favorable aux échanges interdisciplinaires. Eden dispose donc d'assez de liberté pour concevoir et mener à bien une idée qui lui est chère, notamment parce qu'elle correspond chez lui à une préoccupation d'ordre philosophique et théologique qui se révèlera plus tard au grand jour[2]. Il comprend qu'il peut utiliser ses modèles granulaires et stochastiques pour représenter des formes biologiques. Car pourquoi ne pas tâcher de représenter la croissance des tissus biologiques s'il est vrai que ces tissus sont composés de cellules comme le phonème de « traits distinctifs » et comme la lettre écrite de « traits de plume », ainsi que le lui a enseigné Morris Halle ?

Donc Eden se plonge dans des lectures de génétique[3]. Avec la théorie bien connue de la cellule, il a déjà de toute évidence la confirmation du caractère granulaire du substrat biologique. Il lui manque seulement de se voir confirmer l'idée que ce peut être également des processus aléatoires qui gouvernent la multiplication cellulaire. Or, ce rôle déterminant du hasard dans la

---

[1] Dont le statut est hybride : naturel et culturel.

[2] Il sera connu plus tard, en 1967, pour s'être intéressé à la question de l'origine de la vie sur terre et pour avoir produit un argument mathématique tendant à montrer que le hasard ne pouvait à lui seul avoir suffi à cette émergence. Pour cette raison, il est aujourd'hui toujours cité dans de nombreux forums de discussion créationnistes ou anti-créationnistes anglo-saxons. Son argument était d'ordre probabiliste : « Je soutiens que si l'on donne à 'aléatoire' une interprétation sérieuse et cruciale d'un point de vue probabiliste, le postulat de [l'évolution] aléatoire est hautement improbable et qu'une théorie scientifique adéquate de l'évolution doit attendre la découverte et l'élucidation de nouvelles lois naturelles – physiques, physico-chimiques et biologiques », in « Inadequacies of Neo-Darwinian Evolution as a Scientific Theory », publié dans le livre *Mathematical Challenges to the Neo-Darwinian Interpretation*, Paul S. Moorhead and Martin M. Kaplan (eds.), june 1967, p. 109. Cet extrait est lui-même rapporté sur la page du site http://www.creationscience.com/onlinebook/ReferencesandNotes32.html. Eden calculait que s'il fallait seulement six mutations génétiques pour qu'un changement adaptatif se produise, ce type de changement (qui serait alors, on le suppose, sélectionné), à cause de la très faible probabilité de son occurrence, demanderait près d'un milliard d'années avant d'intervenir. Et si l'on passait à 24 mutations nécessaires pour un changement adaptatif, l'espérance mathématique de la durée qu'il faudrait attendre devenait égale à 10 milliards d'années, soit une durée plus longue que l'âge géologique de la terre. Donc il était pour lui « hautement improbable » que la terre ait connu un tel événement, *a fortiori* une collection ou une succession de ce genre d'événements. Il se fondait pour cela sur un modèle probabiliste réducteur du gène où il ne faisait intervenir que des mutations aléatoires (mais pas de fusion de gamètes, ni d'effets de crossing-over).

[3] Voir la bibliographie de [Eden, M., 1960], p. 239.

morphogenèse, il est convaincu de le trouver dans une littérature génétique récente et qui recense l'ensemble des différences organiques existant entre les vrais jumeaux[1] : empreintes digitales des hommes, formes colorées du pelage des veaux, etc. Ainsi il lui « semble raisonnable de supposer que le 'plan de construction' [« *blueprint* »] de la structure n'étend pas ses directives jusqu'à la position de chaque cellule dans l'organisme »[2].

À titre indicatif, rappelons que Waddington utilise aussi ce genre d'argument pour montrer l'insuffisance de l'explication génétique pour la morphogenèse mais il n'en tire pas l'idée qu'il faille recourir à une modélisation probabiliste. Tout au contraire, c'est pour lui l'occasion de rappeler le rôle négligé de l'épigenèse et des contraintes globales mais seulement qualitatives des chemins de développement. À cette époque, cependant, Eden ne semble pas avoir connaissance des travaux de l'embryologie chimique et organiciste. Pour confirmer encore ce rôle du hasard dans la mise en forme organique, il évoque en revanche le fait que le domaine qui s'intéresse aux réseaux de neurones a déjà rendu essentielle cette hypothèse d'un hasard dans la construction des connexions entre les neurones.

Finalement, tout semble vouloir confirmer, de son point de vue, l'intuition qu'Eden avait eue. Voici alors le problème tel qu'il se le pose dans l'article de 1960 : modéliser le développement d'une cellule ou d'un amas de cellules de telle sorte qu'on y voit l'apparition de ruptures de symétrie grâce à un modèle probabiliste et en faisant l'hypothèse que ces cellules ne présentent pas déjà, en elles-mêmes, de telles dissymétries.

Le hasard est donc reconnu ici comme jouant un rôle à une échelle globale dans la mise en place d'une forme. Eden rappelle alors l'impossibilité pour Turing de trouver une formulation analytique (par des équations explicites) pour son modèle déterministe de réaction-diffusion, lorsque ce dernier est appliqué aux deux dimensions d'une surface. Reconnaissant l'extrême complexité de cette approche de Turing, il propose donc une approche constructive par processus réitéré : on part d'une cellule seule, placée sur une grille, et on lui fait donner naissance à une cellule immédiatement voisine, avec une probabilité égale pour le choix de la direction (haut, bas, gauche, droite), enfin on réitère le processus pour chaque cellule. La question qui se pose est donc la suivante : quelles propriétés structurales possède la colonie de cellules au bout d'un certain nombre d'itérations ?

Un second enjeu : estimer une formule inconnue d'analyse combinatoire

Un autre intérêt de cette question pour Eden est qu'elle permet de traiter en même temps un problème mathématique d'analyse combinatoire non-résolu. La préoccupation majeure d'Eden est bien donc aussi d'ordre mathématique. En effet, si on définit une k-configuration comme étant un arrangement de cellules contenant exactement k cellules connectées de quelque manière que ce soit, C^k comme l'ensemble des k-configurations qui sont uniques par translation, rotation ou réflexion[3], alors l'énumération des configurations appartenant à C^k est un problème mathématique non trivial et bien connu en 1960[4]. On ne connaît pas alors d'expression explicite et constructive

[1] [Eden, M., 1960], p. 223.
[2] "That is, it seems reasonable to assume that the 'blueprint' of structure does not extend down to the position of every cell in the organism", [Eden, M., 1960], p. 223.
[3] Ce procédé de l'analyse combinatoire rappelle nettement les transformations laissant invariantes les structures telles qu'elles ont été considérées dans la linguistique structurale. Voir [Jakobson, R. et Halle, M., 1956, 1963], p. 108. Claude Lévi-Strauss s'en est également inspiré. Rappelons que, pendant la guerre, il appartenait, comme Jakobson, au groupe *Word*, fondé à New York.
[4] Il a été mis en lumière par le mathématicien S. Golomb sous la forme de ce qu'il a appelé le problème des « polyominoes ». Voir [Eden, M., 1960], p. 239.

systématique pour retrouver ces k-configurations. En 1958, Eden lui-même avait trouvé une procédure laborieuse pour k variant de 1 à 8, mais non généralisable, semble-t-il. Pour formaliser ce problème, Eden avoue avoir été aidé par le mathématicien Hale Trotter de l'Université Queens de Kingston dans l'Ontario[1].

La solution qu'il préconise est donc de faire générer ces formes biologiques, ou configurations combinatoires, au moyen d'un modèle probabiliste récursif traité par un calculateur numérique, le TX-2 en l'occurrence. Par la génération aléatoire de telles configurations selon la méthode de Monte-Carlo et en conformité avec le formalisme des processus de ramification[2], Eden peut ainsi trouver une estimation de cette valeur arithmétique en faisant « mesurer » par l'ordinateur le périmètre des formes quasi-circulaires que les cellules engendrent globalement sur la table traçante. Une des curiosités de cet article réside donc dans le fait qu'il traite ensemble une question d'analyse combinatoire et une question de morphogenèse. De son côté, le problème combinatoire considéré ne peut donner lieu qu'à des estimations statistiques (matérialisées par la mesure *a posteriori* du périmètre) parce qu'on n'en trouve pas une formule analytique, alors que du côté biologique, l'intérêt est de voir comment une forme biologique globale et dissymétrique peut être engendrée par un processus aléatoire local et réitéré.

Il est révélateur que cette idée ait été le fait d'un statisticien rodé aux mathématiques descriptives. Eden envisage ainsi de circonscrire la solution par estimation statistique. Or, estimer cette valeur introuvable, c'est faire se reproduire des cellules sur un écran et les « mesurer » après coup ; ce qui par ailleurs a tout l'air de ressembler à un modèle simple de croissance d'une colonie de cellules vivantes. C'est donc sur la base d'une ressemblance visuelle grossière avec les processus de multiplication cellulaire qu'Eden fait explicitement le lien entre le problème mathématique et le problème morphogénétique. C'est là que l'exploration mathématique rejoint la modélisation de la croissance du vivant. On en tire en effet immédiatement la conclusion que ce qui est vrai de ce problème d'arithmétique l'est également de la modélisation du vivant : il devient peut-être vain de rechercher avant tout une solution mathématique analytique pour modéliser la morphogenèse. Ainsi, là encore, quand les mathématiques deviennent pour elles-mêmes plus « expérimentales » au contact avec l'outil informatique et avec les nombres pseudo-aléatoires, la morphogenèse semble pouvoir être plus avantageusement « mathématisée ».

Cependant, on pourrait se poser la question : en quoi Eden réussit-il à modéliser une rupture de symétrie dans les motifs biologiques si, globalement, la multiplication cellulaire donne toujours une forme circulaire donc à symétrie maximum ? C'est là que le modèle peut être infléchi vers la problématique embryologique qui inquiétait Turing. Puisque chaque cellule a quatre voisines potentielles et que pour ces quatre cellules filles potentielles, on dispose d'une probabilité d'apparition, il suffit en effet de lui donner des probabilités inégales en fonction des directions (Haut, Bas, Gauche, Droite). La forme globale résultante est alors dissymétrique au sens où elle ressemble à un ballon de rugby : elle est davantage dissymétrique que le cercle[3]. Il rappelle que l'embryologiste Paul Weiss a ainsi montré (en 1955) l'existence de telles dissymétries de croissance dans des populations bactériennes lorsqu'elles sont installées sur un milieu hétérogène quant à la composition en nutriments[4]. Ce qui tendrait à confirmer son approche d'abord purement théorique parce qu'au départ non fondée sur des observations biologiques précises.

---

[1] [Eden, M., 1960], p. 238.
[2] [Eden, M., 1960], p. 224.
[3] [Eden, M., 1960], pp. 234-236.
[4] [Eden, M., 1960], p. 238.

Un stochasticisme biologique

Finalement, en 1960, Murray Eden a bien conscience que les processus stochastiques sont un moyen fécond d'« explorer les processus de croissance »[1]. Il n'emploie cependant jamais dans ce contexte le terme de simulation mais toujours l'expression de modèle probabiliste et de « procédure de Monte Carlo »[2]. Il considère néanmoins que les cellules formelles qu'il fait naître sont les « contreparties »[3] directes des cellules réelles de bactéries ou de tissu en culture. Aussi, pour reprendre un terme que l'historien des sciences Peter Galison a appliqué au chimiste Gilbert King et au physicien Herman Kahn[4] parce qu'ils considéraient que les simulations de Monte Carlo n'étaient pas des calculs mais des reflets de la réalité granulaire et stochastique de leur objet d'étude, il semble que nous puissions également taxer Murray Eden de « stochasticisme », mais d'une espèce nouvelle : un « stochasticisme » biologique. Car c'est bien le substrat biologique, avec ses cellules, qui se révèle pour lui de nature granulaire et stochastique. Et on en est arrivé là, comme en physique nucléaire, par insuffisance des procédés mathématiques habituels. N'oublions pas que c'est lorsque l'on veut représenter formellement la croissance organique non plus seulement en une dimension mais sur deux dimensions, sur un plan donc, et non sur un simple anneau, comme Turing, que la difficulté mathématique (la non-linéarité) suggère de renoncer aux équations analytiques et de passer au comportement stochastique individuel des cellules.

Par la suite cependant, pour des raisons liées au fonctionnement et à la cohérence de son groupe de recherche, Murray Eden devra abandonner cette recherche et focaliser son attention sur la machine à reconnaître les caractères manuscrits, comme en témoignent ses publications ultérieures[5]. Il le fera sans grand succès pour autant. Il ne publiera donc plus de travaux sur la morphogenèse biologique, sauf un rapport interne, en 1966[6]. Au MIT, sa ligne d'approche ne sera pas oubliée toutefois car, en 1966 justement, le laboratoire invitera un botaniste, Dan Cohen, qui avait été intéressé par les premiers résultats de 1960. Mais nous y reviendrons en temps utile.

Bilan sur les premières simulations de la morphogenèse

Un certain nombre d'enseignements peuvent être tirés de cette triple naissance de la représentation formelle de la morphogenèse sur ordinateur (triple si l'on accepte tout de même de faire figurer le modèle de Turing dans cette liste). Tout d'abord, ces premières simulations de la morphogenèse du vivant sont toutes le fait de mathématiciens spécialistes du fonctionnement et des premiers usages de l'ordinateur. Cette naissance a pu intervenir très tôt après la mise à disposition de ces nouvelles machines, et presque dans le même berceau. De plus, aucun des trois protagonistes de cette histoire n'a attendu d'être sollicité par une demande extérieure pour

---

[1] [Eden, M., 1960], p. 239.
[2] [Eden, M., 1960], p. 235.
[3] [Eden, M., 1960], p. 231.
[4] [Galison, P., 1997], pp. 734-739.
[5] Sa machine à lire les écritures manuscrites ne verra pas le jour mais elle sera remplacée par le projet, plus modeste et plus réaliste, de Samuel J. Mason de faire lire et reconnaître les écrits imprimés par un procédé optique et assisté par calculateur. C'est en 1969 que la société ECRM est créée autour de Mason avec le premier dispositif de reconnaissance de caractère ou OCR (*Optical Character Recognition*). Le projet ambitieux d'Eden est donc un demi-échec à côté de la réalisation finalisée de son proche collègue. D'ailleurs, il ne figure pas dans la liste des « great-educators » du MIT, au contraire de Mason, alors qu'il y a enseigné lui aussi très longtemps. On sait par ailleurs combien ce projet de faire reconnaître des écritures manuscrites à la machine est en général passé de désillusions en désillusions, cela jusqu'à nos jours. Voir pour un historique très informé et récent de ce vieux problème [Simon, J.-C., 1998].
[6] Cité par [Cohen, D., 1967], p. 248.

proposer d'étendre son usage de la nouvelle machine au traitement de la morphogenèse. Cela confirme bien l'idée que l'ordinateur, dès son émergence, comble assez immédiatement et assez systématiquement (car à trois reprises dans ces naissances quasi simultanées) une lacune qui, par ailleurs, devait donc être depuis longtemps latente. Car pour que certains des scientifiques les moins avertis en biologie, en embryologie ou en botanique s'aventurent à suggérer de nouvelles formalisations dans ces problématiques, il faut qu'il y ait là une espèce de savoir commun, très peu technique donc, au sujet d'un problème persistant. Ce savoir commun, reconnu et assez facilement reconnaissable est précisément celui d'une série de difficultés qui commencent à apparaître clairement dans les tentatives de représentation formalisée de la morphogenèse : l'hétérogénéité, la spatialité et un certain caractère aléatoire. On est donc là devant un cas où une innovation instrumentale et technologique « débloque » en quelque sorte une situation de *statu quo* et précipite l'advenue de propositions de solution.

Pourtant, ce déblocage ne se produit pas uniformément. Il est très instructif de constater que les usages de l'ordinateur pour représenter la morphogenèse naissent en *ordre dispersé*. C'est la raison pour laquelle on ne peut parler véritablement d'une découverte ou d'une proposition réellement simultanée. Chacun des trois auteurs choisit de privilégier un aspect particulier du phénomène de morphogenèse. En ce sens, ces premières simulations s'apparentent manifestement à la « méthode des modèles » alors en plein essor en biologie et dans les sciences de l'environnement, avec la confirmation et le blanc-seing qui viennent de lui être donnés par ailleurs, par la pensée cybernétique. On doit même dire qu'elles montrent avec force comment l'ordinateur peut amplifier cette nouvelle approche épistémologique qui promeut la diversité formelle en lui donnant une assise encore plus large, c'est-à-dire en rendant manipulables des formalismes jusque là jugés inintéressants ou peu commodes, notamment pour des raisons de difficultés computationnelles.

Ainsi, l'approche de Turing est-elle la plus proche des « modèles » au sens strict, ceux qui sont issus des sciences exactes comme la physique, donc de la tradition ouverte par Faraday, Maxwell, Hertz puis enfin Boltzmann, et qui sont avant tout conçus comme formulations mathématiques simplifiées voire fictives. Turing insiste même sur le fait que son modèle est d'emblée « falsifié », « réfuté ». Il s'inscrit ainsi manifestement dans la tradition d'un certain positivisme fictionnaliste et commodiste, si l'on peut dire. Il rejoint cette sorte de fictionnalisme fort ou « idéalisme positiviste » que le philosophe Hans Vaihinger prônait en 1911, dans sa *Philosophie des 'als ob'*[1]. Celui-ci affirmait en effet que tout ce qui permet d'expliquer le monde repose sur des fictions, et que, en dernière analyse, tous ces construits fictionnels comportent d'un certain point de vue des contradictions internes et sont donc dès le départ inconsistants. On ne peut comprendre le monde qu'en se contredisant[2].

À le lire, Turing s'annonce prêt à assumer une telle inconsistance et donc un tel déracinement des formalismes. Mais en même temps, comme nous l'avons montré, sa position est ambiguë. Car il s'inscrit aussi dans une autre tradition : celle de l'embryologie chimique théorique,

---

[1] Rappelons que ce texte remontait pour l'essentiel aux années 1876-1879. Il s'était développé dans l'esprit d'une reprise post-kantienne de l'empirisme anglo-saxon. Il a donc largement ignoré les prémices du pragmatisme américain comme celles du positivisme viennois des décennies qui ont suivi. Il n'a été publié qu'en 1911, après de longues tergiversations et multiples avatars. Voir [Vaihinger, H., 1911, 1935], pp. xxiii-xlviii.

[2] "To understand is to reduce to known ideational constructs. Empty space, and atoms interpreted in a material sense, seem to be such constructs, but in actual fact they are only fictions [il s'agit ici d'une allusion aux paradoxes de Zénon]. If however we succeed in reducing everything to these fictions then the world seems to be understood. It *seems* to be ! These apperceptive constructs are fictions, the product of the imaginative faculty […] Thus the immense work of modern science reduces all existence, which in the last analysis is absolutely incomprehensible, to an entirely subjective and purely fictional standard", [Vaihinger, H., 1911, 1935], pp. 52-53. Nous citons ce livre dans sa traduction anglaise.

c'est-à-dire cette partie de l'embryologie qui reste fidèle à la recherche classique d'authentiques théories et non de modèles déracinés, et qui tend à se demander en priorité à quel type de phénomènes physico-chimique il est possible de réduire, en première analyse, les processus de morphogenèse. Or, il y a bien aussi une trace de ce réductionnisme unitaire dans le travail de Turing. Et le fait que son travail ait été d'abord récupéré et revendiqué quasi-exclusivement par l'école de botanique théorique de Manchester en dit assez long sur les limites de son modélisme de fait. Son épistémologie explicite est donc en avance sur sa pratique de formalisation effective. Son chimisme ne peut que contredire son modélisme. Dans le prolongement de Turing, on ne peut guère envisager la simulation comme autre chose que comme un calcul approché d'un modèle dynamique non-linéaire sur ordinateur.

Du point de vue de la forme des vivants, l'aspect que privilégie Turing est celui de l'émergence d'une hétérogénéité dans les tissus organiques. Cette hétérogénéité et cette dissymétrie étaient bien en effet un des achoppements que rencontraient les modèles explicatifs réductionnistes antérieurs. L'usage de l'ordinateur étend l'empire des modèles mathématiques explicatifs en rendant soluble une catégorie de ces modèles jusque là rebelle au calcul.

Il en va tout autrement du travail d'Ulam. C'est avec lui que naît véritablement la simulation sur ordinateur. Ulam part d'emblée d'une discrétisation. Sensible à une vision plus empiriste des modèles mathématiques eux-mêmes, il fragmente irrémédiablement toute formulation qui se voudrait théorique et unitaire. Son approche est constructiviste, en ce sens. Sa vision granulaire des concepts bénéficie d'une rencontre heureuse avec un objet biologique. Et elle peut être avantageusement instrumentée et amplifiée par l'ordinateur. Ulam n'est pas fasciné par l'aléa en tant que tel. Il ne se rapproche pas du vivant par ce biais-là, mais plutôt par le biais d'une approche populationnelle et surtout *répartie dans l'espace* des phénomènes de morphogenèse. Ce qui l'intéresse est cette émergence de formes globales à partir de règles locales de réitérations valant sur des formes géométriques élémentaires. C'est donc plutôt l'obstacle de la spatialité, de la bidimensionnalité, des interactions parallèles et non unilinéaires qui les accompagnent, qu'il propose que les formalisations de la morphogenèse franchissent avec l'aide de l'ordinateur.

En contact étroit avec von Neumann, Ulam hérite lui aussi en quelque manière de l'esprit qui anime la « méthode des modèles ». Mais alors que von Neumann insistait surtout sur les isomorphies, donc sur des similitudes purement formelles et sur des identités entre logiques par-delà la différence entre les substrats, avec la méthode de Monte-Carlo, Ulam apprend pour sa part à re-donner un aspect concret aux formalismes : le caractère aléatoire et le caractère réparti. C'est en ce sens que les formalisations d'Ulam sont des simulations au sens fort : elles sont des imitations partielles, sans totale transposition algébrique ou symbolique, de certains des caractères présents dans les phénomènes.

Mais le fait que ce soit justement certains de ces caractères qui soient plus particulièrement pris en compte et simulés contribue tout de même à faire rentrer ces simulations de la morphogenèse dans la catégorie des modèles simplificateurs et perspectivistes. En ce sens, Ulam, lui aussi ne fait qu'étendre l'emprise des modèles. Il contribue à amplifier leur diversification comme leur dispersion.

C'est enfin Eden qui va mettre en lumière l'intérêt de la formalisation synthétique de l'aléa dans la multiplication cellulaire. Lui aussi, il spatialise sa représentation en recourant à une grille de points. Mais c'est surtout afin de voir empiriquement ce que donne à la longue la réitération de *règles probabilistes locales*. Il veut voir si un ordre ou une dissymétrie émerge de la conjonction de ces aléas élémentaires. Et seuls la rapidité de calcul et les périphériques d'affichage graphique de l'ordinateur permettent une telle expérience. Ce faisant, il importe dans le domaine des

formalisations de la morphogenèse une technique d'identification de modèles issue de la reconnaissance automatique de formes. Plus proche des problématiques de mesure, et notamment de mesure de formes, il est compréhensible qu'il soit mû par une conception d'emblée statistique, davantage liée à la morphométrie. Mais le passage à la discrétisation de principe lui est suggéré par sa collaboration avec des linguistes pour lesquels le langage présente, d'évidence, un ensemble de systèmes discrets. Il ne lui reste alors plus qu'à penser à la théorie cellulaire, depuis longtemps notoire en biologie pour qu'il s'essaie à la simulation de croissances cellulaires.

Même si elles conservent leur caractère concret à certains aspects du phénomène, les simulations d'Eden font donc aussi des choix : l'aléa et la répartition. L'hétérogénéité y est laissée un peu de côté même si, dans ses efforts pour complexifier son modèle de simulation, il rejoint au passage la théorie des gradients chimiques de Child et s'il retrouve l'allure de certains résultats empiriques de Paul Weiss. La ramification ne peut y être simulée, par exemple, au contraire de l'approche d'Ulam. C'est pourquoi il présente sa simulation comme une formalisation approchée de la croissance d'une colonie de monocellulaires.

Finalement, comme les modèles mathématiques qui leur sont contemporains, ces premières simulations sont différentes entre elles du point de vue du formalisme adopté, comme du point de vue de l'option prise par rapport à ce que le formalisme doit prioritairement représenter, comme encore du point de vue du rôle conféré à l'ordinateur. La simulation des formes sur ordinateur naît bien, elle aussi, en ordre dispersé, comme nous le pressentions.

De plus, il faut reconnaître que, même si elles présentent des rapprochements plus étroits avec le caractère concret des phénomènes par rapport aux modèles mathématiques, cela ne leur permet pas pour autant de sortir de l'approche purement spéculative qui est communément la leur à l'origine. Ces simulations paraissent plus concrètes, à certains égards, que les modèles, mais elles sont encore bien trop théoriques en un sens précis : aucune ne prête directement et véritablement à une confrontation avec l'expérience. Aucune ne paraît pouvoir être calibrée d'emblée. La suite des événements a pleinement témoigné en faveur de ce diagnostic d'infirmité : il faudra attendre les années 1967 et 1968 pour que l'on envisage de les faire se confronter au terrain.

Entre-temps, les biologistes théoriciens, submergés par la diversité des modèles perspectivistes et déracinés, vont continuer à faire évoluer leurs stratégies de résistance. Certes, ils ne lutteront plus directement contre le déracinement, de peur d'être taxés de réductionnistes étroits ou idéalistes, mais ils lutteront contre la dispersion des modèles, phénomène qui est lui-même un résultat du déracinement de l'époque antérieure. Ils lutteront aussi, ce qui est nouveau, contre un des promoteurs les plus efficaces de cette dispersion, à savoir l'ordinateur. Mais, auparavant, précisément afin de mieux comprendre dans quel nouveau contexte ces théoriciens de la morphogenèse vont se retrouver et devront s'adapter, il nous faut parcourir d'un rapide regard la nature des différents usages de l'ordinateur en biologie en ce début des années 1960, c'est-à-dire peu après son apparition et sa diffusion. Le renouvellement des problématiques plus spécifiques de formalisation de la morphogenèse sous l'effet de l'émergence de l'ordinateur comme les nouvelles formes de résistances intellectuelles que cette émergence a occasionnées nous apparaîtront ensuite d'autant plus clairement et distinctement.

CHAPITRE 11 - Le *computer* en biologie dans les années 1960 : un tour d'horizon

Il ne sera bien sûr pas question dans ce chapitre de produire une histoire circonstanciée et complète de l'émergence de l'ordinateur dans les sciences du vivant. Le dépouillement d'archives auquel nous nous sommes livré sur cette question n'a consisté qu'en une série de sondages destinés à contextualiser notre histoire, par ailleurs bien plus sélective, de la mathématisation des formes du vivant. Cette histoire générale n'étant que très fragmentairement écrite par ailleurs[1], les résultats que nous proposons ici ne seront donc que très partiels. Mais ils indiquent néanmoins déjà quelques lignes de forces qui nous sont apparues difficilement contestables. Comme ils nous semblent devoir éclairer par contraste les inflexions dans les usages et les conceptions de la formalisation que nous évoquerons par la suite, il est essentiel d'en rendre compte dès maintenant.

De la physique à la biologie

Pour nous aider dans ce travail de sondage, nous ne partions toutefois pas de rien dans la mesure où nous avions à notre disposition un ensemble de publications récapitulatives produites par des scientifiques eux-mêmes au début des années 1960. En effet, à cette époque-là, les langages évolués[2] et les nouveaux matériels, dits de troisième génération[3], se sont déjà bien répandus dans les universités américaines. Il devient donc plus facile de programmer de longs calculs. En outre, sous l'impulsion des physiciens le plus souvent, le développement de la gestion centralisée des machines et, plus spécifiquement, de l'utilisation des gros calculateurs met ce temps de calcul à disposition des autres départements universitaires qui sinon n'auraient pas sans doute eu pour priorité financière ou technique de recourir à ces machines. Comme nous l'avons déjà évoqué, c'est le MIT qui, avec le projet MAC lancé en 1961, concrétise systématiquement le *time sharing*[4] au niveau de la recherche universitaire. Ce concept s'impose au vu de l'accélération considérable des temps de calcul des machines en comparaison de la stagnation, voire de

[1] L'historien des sciences Giorgio Israel a pour sa part insisté davantage sur la naissance de la modélisation mathématique en biologie que sur les effets de l'émergence de l'ordinateur en ce domaine. En plus de l'histoire des modèles de Volterra et Lotka, il a notamment restitué l'histoire particulière de l'usage du modèle de Van der Pol. Il montre ainsi combien le choix pour la modélisation mathématique signifie le passage à une mathématisation directe, fondée sur une pure « analogie mathématique » globale, sur ce que Bertalanffy appelait un « isomorphisme » en référence à la théorie algébrique, et non sur une construction d'un modèle mécanique préalable. Voir [Israel, G., 1996], pp. 34-51.

[2] FORTRAN (FORmula TRANslator) est créé dans première version en 1954, ALGOL (ALGOrithmic Language) en 1958. La version IV de FORTRAN est diffusée en 1962. Voir [Lévènez, E., 1999], p. 1. Même s'il faudrait s'entendre sur la définition précise de langage informatique, en 1999, Eric Lévènez évoque l'existence de près de 2500 langages existant ou ayant existé dans le monde, *ibid.* L'objectif d'ALGOL (émanation du COBOL lui-même institué par l'administration américaine) « était de suivre de très près la procédure mathématique de solution algébrique des problèmes », [Ramunni, G., 1989], p. 163. ALGOL eut un certain succès en France. Voir les nombreux travaux sur les procédures ALGOL à destination des ingénieurs et programmeurs mis en œuvre aux cours des Recherches Coopératives sur Programme n°30 et n°136 du CNRS. Ils donnèrent lieu à publication : [Kuntzman, J., 1967] et [Gastinel, N., 1970].

[3] [Bertin, J., Ritout, M. et Rougier, J.-C., 1967], p. v.

[4] Les ingénieurs français reprendront la définition du MIT en 1967 : « Nous définirons l'emploi partagé comme une multiprogrammation dans laquelle l'utilisateur a possibilité d'accès direct à la machine tout en étant assuré d'un temps de réponse aussi voisin que possible de ce qu'il serait s'il était seul à disposer de la machine », [Bertin, J., Ritout, M. et Rougier, J.-C., 1967], p. 16. Cet ouvrage rend compte des différentes écoles qui existaient alors au sujet des techniques à privilégier pour partager le temps de calcul.

l'augmentation, des temps de conception et de programmation nécessaires aux scientifiques et programmeurs, cela à cause de la complexité croissante des tâches demandées et malgré le recours à des langages évolués. Ces calculateurs chers et puissants que les universités acceptaient d'acheter, risquaient donc d'être immobilisés l'essentiel de leur temps pour des raisons autres que leur simple fonctionnement comme calculateurs. Pour toutes ces raisons, il fallait donc partager le temps de calcul.

Débuts lents et sporadiques, mais volontarisme des *National Institute of Health*

Or, le MIT, mettant cette nouvelle puissance de calcul partagé que représentait l'IBM 7094[1] à disposition de tous ses départements, mais aussi de près de 40 autres universités américaines, se livre très rapidement à des statistiques sur son usage. En 1961, un rapport publié par les *Cooperating Colleges of New England*[2] indique ainsi que seulement 5,6% du temps de calcul total est utilisé par les sciences biologiques. Sur ce faible pourcentage, 0,8% du temps de calcul total est consacré à la cristallographie des substances organiques, 1,4% à la psychologie, 1% à l'agriculture, 1,5% à la médecine, 0,9% aux recherches biomédicales ou biologiques. Tout le reste est consacré aux sciences physico-chimiques et aux recherches mathématiques. Comme on peut le constater, la tendance en ce début des années 1960, n'est pas du tout à l'explosion des usages de l'ordinateur dans les sciences biologiques. En biologie proprement dite, les recours au calculateur sont donc encore, on peut le supposer, très marginaux.

Un second rapport, très significatif lui aussi, est publié deux ans plus tard, en 1963, par le même regroupement d'universités autour du calculateur partagé du MIT. Il révèle cette fois-ci que seulement 4,5% du temps de calcul a été utilisé par les sciences biomédicales, dont 0,3% en médecine, 1,1% en psychologie, 1,3% en cristallographie des substances organiques, 0,2 en agriculture et 1,6 en biologie[3]. Il faut bien sûr nuancer le poids de ces chiffres en rappelant que, sur cette courte période, la physico-chimie a encore considérablement développé ses propres usages de l'ordinateur et que la biologie semble quand même avoir très timidement imposé sa présence. Mais le bilan est assez mitigé pour ceux qui voient en ces nouvelles techniques de calcul une chance pour la biomédecine.

Ainsi les *National Institutes of Health* s'inquiètent suffisamment de cette situation pour qu'un certain nombre de travaux de synthèse, jouant en même temps le rôle délibéré d'une promotion, paraissent sur les différents usages d'ores et déjà possibles et souhaitables des calculateurs dans les sciences biomédicales[4]. C'est la raison pour laquelle nous disposons

---

[1] La série des IBM 7090 était une version entièrement transistorisée de l'IBM 709. Les IBM 7090 valaient entre 2 à 3 millions de dollar et elles pouvaient effectuer 210000 opérations à la seconde [Boucher, H., 1960], p. 405.

[2] Rapport cité par [Ledley, R. S., 1965], pp. 250-251.

[3] Rapport cité en note par [Ledley, R. S., 1965], p. 251.

[4] Cette activité d'information et de promotion est perceptible à travers les publications de Robert S. Ledley (de la *National Biomedical Research Foundation*) comme de celles de David Garfinkel du début des années 1960. L'un et l'autre publient leurs résultats dans des revues scientifiques couvrant un large spectre de lecteurs comme *Science* et *Nature*. Elle est manifeste dans une publication collective et monumentale (en 3 volumes de 1213 pages en tout) intitulée *Computers in Biomedical Sciences* [Stacy, R. W. and Waxman, B. D., 1965, 1969]. Cette publication est en effet une synthèse des recherches en *biomedical computing* directement commanditée par les *National Institutes of Health.* Un de ses directeurs, James A. Shannon, s'y exprime ainsi dans l'avant-propos : "Much of the work reported in these volumes was made possible by virtue of NIH support, tendered on the expectation that this powerful and new technology would not only facilitate the solution of problems as currently formulated, but also, like the telescope, would permit the exploration of phenomena otherwise unapproachable", *ibid.*, Tome I, p. xi. Ralph Stacy et Bruce Waxman insistent dans leur préface : "Within the last few years computers have had an increasing influence on biomedical research. Despite a growing awareness of the utility of the computer as a research tool, many life scientists are still uniformed regarding the

aujourd'hui de travaux de synthèse qui brossent le tableau des différents usages du calculateur numérique dans la biologie, principalement américaine, au milieu des années 1960.

Quatre différents usages du calculateur numérique en biologie

Notre tableau, très synthétique, de ces différents usages du calculateur numérique dans les sciences de la vie au milieu des années 1960 nous a été, entre autres, suggéré par le travail[1] de Robert S. Ledley. C'est un chercheur de la *National Biomedical Research Foundation* de Silvers Spring (Maryland) qui pendant plusieurs années, entre 1959 et 1965, se voit donner la mission de recenser les différentes recherches biologiques et biomédicales ayant recours au calculateur et de publier des compte-rendus à ce sujet. Nous nous aiderons également des publications de David Garfinkel sur la simulation numérique en biochimie et écologie. Garfinkel est alors un biophysicien rattaché au *Department of Biophysics and Physical Chemistry* de Britton Chance. Enfin, nous nous appuierons sur les indications du neurophysiologiste W. Reichardt, du biochimiste M. Pring et du chercheur en recherche opérationnelle George B. Dantzig. Nous nous restreindrons bien sûr ici aux usages liés à des représentations formelles et à leur traitement par calculateur. Car ce sont elles qui ont un rapport direct avec la modélisation mathématique. Nous ignorerons ainsi d'autres usages, plus hybrides, comme les systèmes de mesure en temps réel assistés par ordinateur bien qu'ils n'aient certainement pas joué de rôle tout à fait négligeable quant à l'évolution des formalisations elles-mêmes.

Premier usage : la résolution d'équations différentielles, d'équations de flux ou de modèles à compartiments

Un des premiers usages du calculateur numérique que l'on peut recenser est celui qui est intervenu dans les laboratoires qui avaient traditionnellement recours au calcul analogique (*via* une analogie mathématique) au moyen d'analyseurs différentiels. L'apparition de ces calculateurs analogiques était elle-même récente. Même s'il existait des projets pour des machines semblables dès les années 1920, et même si W. Thomson (Lord Kelvin) avait, en 1876, conçu un analyseur harmonique sur une base mécanique, c'est un ingénieur du MIT, Vannevar Bush, qui à partir de 1931, et sur une base électromécanique, mit au point un intégrateur analogique rapide et paramétrable de façon assez souple[2]. Les secteurs de la biologie qui ont été les principaux utilisateurs de cette technique ont été ceux dans lesquels des formulations mathématiques de type équations différentielles simultanées (de taux, de flux ou de suivi quantitatif de substances par des modèles à compartiments) étaient systématiquement traitées et en grand nombre[3].

---

full range of application and great flexibility of this technology", [Stacy, R. W. and Waxman, B. D., 1965, 1969], p. 1. Il s'agit donc bien d'une opération de promotion.

[1] [Ledley, R. S., 1965], p. 250-291.

[2] [Pratt, V., 1987, 1995], pp. 160-162. Pour une brève restitution des travaux de Bush et une analyse de son point de vue selon lequel tout problème de calcul doit être pensé à l'image d'un problème d'instrumentation, voir [Ramunni, G., 1989], pp. 30-32.

[3] [Ledley, R. S., 1965], p. 288.

Les modèles à compartiments

À partir de la méthode expérimentale du marquage radioactif récemment mise en œuvre (1951) dans un contexte physiologique par C. W. Sheppard, alors chercheur à l'université de Memphis (Tennessee), il a été possible de suivre en temps réel la localisation des substances et la variation de leurs quantités dans les diverses unités fonctionnelles des organismes autrement difficilement accessibles. Cette technique s'apparentait alors manifestement à celles du marquage des animaux (bagues, etc.)[1] employées par ailleurs en dynamique des populations et écologie depuis les années 1920[2]. Les chercheurs dès lors vite conscients du caractère hautement générique de cette technique ont donné ensuite naissance à un procédé général de modélisation : la modélisation dite « par compartiments » fonctionnels. Il consiste d'abord à formaliser graphiquement (sous forme de 'boîtes noires' et de flèches) les divers flux existant entre différentes classes d'éléments[3] et ensuite à représenter formellement ces flux par des équations différentielles (le plus souvent linéaires) ou par un formalisme matriciel de changement d'états.

Significativement, c'est seulement à partir de 1969 que C. W. Sheppard lui-même passe à la simulation par ordinateur[4] de ces suivis de substances, notamment au moyen de processus stochastiques et de la méthode de Monte-Carlo[5]. Ce faisant, il revient à la première approche mathématique qui a été la sienne (en 1951) pour les processus de diffusion de substances marquées : l'approche par les formalismes des marches aléatoires et du mouvement brownien, formalismes qui étaient eux-mêmes venus de la physique. En 1969, la simulation numérique par la méthode de Monte-Carlo a donc clairement pour lui la fonction de « tester la théorie » agrégée, qui reste pour sa part exprimable dans le formalisme des compartiments[6]. Une telle simulation numérique[7] présente l'intérêt, dit-il, de nous donner un « aperçu intuitif éclairant »[8] sur la théorie. À la même époque, en France, alors même qu'on en fait grand cas, on ne cherche pourtant pas particulièrement à rapporter la modélisation par compartiment à ces techniques de simulation atomique constructive. La raison en est que l'aspect fonctionnel des micro-événements, au sens biologique et surtout physiologique, disparaît dans la simulation. Dans un esprit hérité de Prenant et Teissier, on y appréciera donc longtemps la méthode des compartiments comme une

[1] [Legay, J.-M., 1973b], p. 136.
[2] Voir le chapitre de A. Tétry sur l'écologie *in* [Taton, R., 1964, 1995], p. 683.
[3] L'« élément circulant » peut être de toute nature comme le remarque [Legay, J.-M., 1973b], pp. 122-123 : animal circulant entre divers lieux, cellules entre divers organes, hormones entre divers tissus, ion entre divers lieux d'une même cellule, atome entre divers molécules. On voit que cette technique met l'accent sur la généralité à toute échelle des phénomènes de flux et de « circulation » au delà-même des sciences de la vie et même des sciences de la nature car « l'élément circulant pourrait être une bille ou un automate quelconque », *ibid.*, p. 123.
[4] Sur un IBM 1620, [Sheppard, C. W., 1969], p. s15.
[5] [Sheppard, C. W., 1969], p. s14.
[6] [Sheppard, C. W., 1969], p. s14.
[7] Ou « échantillonnage de modèle » selon l'expression qu'il reprend aux statisticiens cités eux-mêmes par [Marshall, A. W., 1954].
[8] Traduction que nous proposons pour l'intraduisible 'insight' : "As Hamming has asserted 'the purpose of computing is insight' and our progress in this direction is often aided by the simulation of stochastic processes by the use of high-speed stored-program digital computers", [Sheppard, C. W., 1969], p. s14. On reconnaît là un travers épistémologique qui pourrait en effet s'apparenter à une constante anglo-saxonne : ne pas se contenter d'abstraire mathématiquement, mais tâcher aussi de se représenter quasi-visuellement ce qui se passe dans le modèle phénoménologique ou abstractif, en gagner une sorte d'intuition constructive et donc souvent, il est vrai, mécaniste. Ce souci paraît absent des travaux français parce qu'ils semblent davantage sensibles à l'urgence de contrôler constamment le modèle à tous les niveaux avec des concepts biologiques déjà existants et reconnus par ailleurs.

modélisation certes phénoménologique mais ayant en même temps la grande qualité de conserver le sens biologique des lois mésoscopiques qu'elle intègre[1].

Ainsi, dans les simulations de systèmes biologiques ou écologiques faisant intervenir des équations différentielles couplées ou des boucles de contrôle pour des flux de tous ordres, les calculateurs analogiques, ou analyseurs différentiels, ont en fait concurrencé les calculateurs numériques assez longtemps, jusqu'à la fin des années 1960[2]. Auparavant, à partir de 1940, la pratique systématique d'analyseur différentiel était venue à la biologie essentiellement par les neurophysiologistes[3] mais aussi par les chimistes travaillant dans la biochimie ou dans la physiologie chimique comme Britton Chance par exemple[4]. L'expression de « simulation mathématique » y avait donc déjà cours au sens où l'analogie mathématique était directement exprimée par des modules électriques combinables et paramétrables à la main. Dans la biochimie, par exemple, le terme de « simulation » sera naturellement transmis et conservé pour désigner les approximations discrètes sur calculateur numérique des toujours mêmes modèles mathématiques continuistes[5]. Il est à noter que ce terme n'avait pas encore le sens plus strict qu'il gagnera au contact de la méthode de résolution stochastique de Monte-Carlo.

Cependant, spécifiquement en dynamique des populations, la naissance de modèles exprimant et traitant en temps discret et par récurrence les problèmes de flux de populations, a précédé de quelques années l'émergence du calculateur numérique[6]. Cette discipline en marge de la biologie et déjà fortement mathématisée s'est donc distinguée de ses voisines en passant assez naturellement, sous l'influence notamment des méthodes de la démographie humaine, d'une approche géométrique et continuiste à une approche algébrique et matricielle[7]. Cette inflexion, juste antérieure à l'apparition des calculateurs numériques, vers une formalisation algébrique a beaucoup fait ensuite pour fixer assez tôt l'emploi de ces machines dans cette discipline car le traitement algébrique et par récurrence s'exprime très simplement au moyen de programmes informatiques. Il s'agit là en quelque sorte d'une rencontre heureuse entre la suggestion

[1] [Cheruy, A., Gautier, C. et Pavé, A., 1980], p. 103.

[2] Même si elle représente une tentative techniquement et épistémologiquement très significative de trouver un compromis entre la précision du numérique et la vitesse de l'analogique, nous ne nous étendrons pas ici sur la solution des calculateurs hybrides telle qu'elle a pu exister un temps et être mise en œuvre dans les années 1960. Selon nous, elle n'a pas joué de rôle absolument décisif dans l'histoire des formalismes intervenant dans les modélisations mathématiques. En effet, les propositions formelles tant du côté analogique que du côté numérique étaient de part et d'autres définies déjà durablement cela même avant l'intervention de cette technologie hybride. De plus, les langages de programmation commercialement disponibles n'ont pas suivi la complexification qu'imposait une telle hybridation.

[3] Depuis les célèbres travaux d'A. L. Hodgkin et A. F. Huxley (1952), la neurophysiologie a confirmé la pertinence de ses très anciens modèles électriques en les étendant à l'électronique. Voir [Cole, K. S., 1955], pp. 152-155. En 1965, W. Reichardt du *Max-Planck Institut für Biologie* propose par exemple un modèle de type électronique analogique pour un mouvement optomoteur de perception visuelle qu'il a proposé au milieu des années 1950 et publié dans la revue *Kybernetik*. Voir [Reichardt, W., 1965], p. 361.

[4] [Garfinkel, D., 1965], p. 112.

[5] Voir par exemple l'usage indifférent que David Garfinkel fait du terme « simulation » pour désigner le calcul d'un modèle mathématique différentiel tantôt sur calculateur analogique tantôt sur calculateur numérique, [Garfinkel, D., 1965], *passim*.

[6] Avec les travaux de P. H. Leslie et D. G. Kendall. Voir l'article *princeps* : [Leslie, P. H., 1945]. Pour les détails de la chronologie, voir [Legay, J.-M., 1973b] et surtout [Lebreton, J.-D., 1973].

[7] Pour des raisons indépendantes du développement des calculateurs numériques. P. H. Leslie voulait en effet suivre non seulement les effectifs mais la répartition en classe d'âges de ses populations. Il lui a donc fallu descendre quasiment au niveau des événements individuels par tranches d'âge pour représenter ensuite les évolutions en parallèle (toujours selon un modèle linéaire mais avec une expression cette fois-ci algébrique de type récurrence matricielle) de ces différentes populations. Le formalisme matriciel était en fait né auparavant, dans les modèles de démographie humaine, [Lebreton, J.-D., 1973], pp. 94 et 100. Voir [Leslie, P. H., 1945]. Par la suite, Leslie a également eu l'idée de rendre ces modèles matriciels stochastiques suivant en cela le modèle de Yule (1924). Dans ces conditions, c'était inévitablement rejoindre le formalisme naissant des processus de ramification. Voir [Leslie, P. H., 1958], [Leslie, P. H. et Gower, J. C., 1958], [Lebreton, J.-D., 1973], p. 97 et [Harris, T., 1963, 1969].

conceptuelle de recourir à de nouvelles mathématiques et l'apparition d'une nouvelle technologie permettant de les traiter commodément, l'une renforçant l'autre. L'ajout du formalisme stochastique des processus de ramification à l'approche algébrisée a contribué à achever ce processus de « numérisation » des calculateurs en génétique des populations car, dans ce cadre-là, il n'y a pratiquement plus que la simulation de type Monte-Carlo pour effectuer les calculs[1].

Ce passage au stochastique en dynamique des populations était lui aussi antérieur à la mise à disposition des calculateurs numériques. Les processus stochastiques de type Galton-Watson ont en effet connu un regain d'intérêt au début des années 1940, d'une part à cause de l'analogie nouvellement perceptible entre la croissance des familles et les réactions nucléaires en chaîne, d'autre part du fait que la théorie des probabilités avait récemment trouvé un fondement mathématique plus solide et donc d'apparence plus fiable, dans les travaux de Kolmogorov (1933), notamment[2]. Ce n'est donc pas totalement un hasard si les calculateurs numériques ont trouvé à s'employer efficacement dans des modèles stochastiques en biologie, et ont ensuite travaillé à y renforcer la présence de ce formalisme, puisqu'un des premiers usages de ces machines en physique a consisté à simuler précisément des processus de ramifications aléatoires de type réactions nucléaires en chaîne.

Toujours est-il que le double passage à un formalisme discret et stochastique impose inévitablement à cette discipline de s'interroger, comme auparavant la physique nucléaire, sur la signification et sur la valeur de preuve du calcul par simulation numérique. Et c'est là glisser insensiblement vers une autre interprétation du calcul sur ordinateur. C'est notamment rejoindre les questions épistémologiques que le quatrième type d'usage du calculateur numérique va clairement poser : que fait-on quand on formalise ainsi ? Représente-t-on les phénomènes biologiques ou écologiques ? Ou calcule-t-on simplement ? Nous y reviendrons plus bas. Quoi qu'il en soit, de leur côté, et de façon *a priori* assez surprenante, mais pour d'autres raisons, tous les biophysiciens n'ont pas été tout de suite convaincus par l'idée même d'un passage naturel du calcul analogique au calcul numérique.

La figure du biophysicien F. Heinmetz peut être ici brièvement évoquée pour illustrer l'inertie voire la résistance qui a pu parfois accompagner ce type d'emploi des calculateurs. Car elle nous montre un biophysicien au départ fortement attaché à la modélisation analogique et ce, jusqu'à la fin des années 1960. Titulaire, en 1933, du diplôme d'ingénierie électrique de l'Université de Tallin, en Estonie, puis d'un doctorat de biophysique de l'Université de Pennsylvanie, en 1946, Heinmets devient, en 1958, le chef du groupe de biophysique des Laboratoires Natick de l'armée américaine. À ce titre, pendant une dizaine d'années, il travaille à la modélisation des processus de croissance cellulaire à un niveau moléculaire. Ces travaux recoupent alors un certain nombre des préoccupations formelles de François Jacob et Jacques Monod sur les processus d'activation et d'inhibition de la synthèse protéique. Or, un peu plus tard, alors qu'on est en 1969, pour modéliser ses 19 équations différentielles simultanées[3], il privilégie toujours l'approche analogique

[1] Voir [Lebreton, J.-D., 1973], p. 103 : « Outre des résultats asymptotiques assez abondants, les modèles multitypes en temps discret ont pour avantage un formalisme simple, qui facilite en particulier leur mise en œuvre numérique. » De façon très significative, J.-D. Lebreton rappelle toutefois qu'il n'existe pas d'accord total entre les généticiens des populations au sujet de la signification de cette algébrisation des formalismes : « Il s'agit d'analogues discrets du modèle intégral, et certains auteurs (J.-P. Nakache 1969 [*Différentes méthodes de résolution de l'équation fondamentale de Lotka*, Publication de l'ISUP, 18, 149-171]) n'ont même voulu y voir qu'une méthode de résolution de l'équation de Lotka. Valorisés par leur commodité d'emploi, ces modèles matriciels n'en ont pas moins vu le jour indépendamment de la formulation intégrale et se sont développés à partir des travaux de Bernardelli (1941), Lewis (1942), et surtout Leslie (1945, 1948) », [Lebreton, J.-D., 1973], pp. 94-95.
[2] Voir [Harris, T. E., 1963, 1969], pp. 2 et 263.
[3] [Heinmets, F., 1969], p. 162, tableau 3.

par analyseur différentiel. Et, alors même qu'il voit bien les problèmes d'instabilité que pose la non-linéarité de son modèle, il propose, pour les résoudre, une stratégie d'intervention directe dans le modèle analogique au moyen d'un forçage momentané de la valeur de certaines variables. Ces dernières sont en effet contrôlables car elles sont accessibles en temps réel sous forme de valeurs électriques dans le réseau de l'analyseur différentiel. Selon Heinmets, en fait, il s'agit ainsi d'inciter le système électrique à modéliser réellement un « système fonctionnel »[1]. Car s'il entre dans un « état désorganisé »[2], le « système-modèle » ne remplit plus son office qui est de modéliser un système biologique.

Si l'on y regarde de plus près, et c'est cela qui nous intéresse ici, cette stratégie de règlement du problème de l'instabilité, sans doute curieuse d'un point de vue actuel, s'explique à l'époque assez logiquement par le statut épistémologique qu'Heinmets confère par ailleurs et en général à la modélisation mathématique en biologie. Selon lui en effet, dans un passé récent, les méthodologies biochimiques et physiologiques se sont davantage penchées sur les processus moléculaires ou les mécanismes fonctionnels spécifiques[3]. Ce qui avait pour conséquence de limiter l'étude à quelques interactions seulement. Les connaissances acquises n'étaient certes pas sans valeur, mais elles étaient de portée fatalement limitée. La modélisation, quant à elle, répondrait donc aujourd'hui, en 1969, au nécessaire besoin d'« intégrer de l'information provenant de divers sous-systèmes »[4] pour gagner une vision plus juste du « comportement fonctionnel propre au système total »[5]. C'est donc pour cette raison principale que cette nouvelle méthodologie, la modélisation sous forme de construction de « systèmes-modèles », aurait été développée en biologie. Mais, selon Heinmets, il apparaît que cette méthodologie doit être surveillée. Car ce n'est pas n'importe quelles unités que l'on doit intégrer dans un « système-modèle » au titre de « sous-modèles ». Ces sous-modèles doivent correspondre chacun à des « sous-systèmes » également fonctionnels d'un point de vue biologique. Il doivent coïncider chacun avec une « unité fonctionnelle » faute de quoi les propriétés qui seront exhibées dans le « système-modèle » total seront « dépourvues de sens »[6]. Or c'est bien là ce qui justifie en dernière analyse l'autorisation surprenante qu'Heinmets se donne d'intervenir dans le modèle analogique, lorsque ce dernier menace de conduire à un « état désorganisé ». Le but de la modélisation étant, selon lui, l'*interprétation* de l'intégration des différents sous-modèles, afin qu'il y ait une réelle interprétation globale, il faut que les sous-modèles modélisent raisonnablement, si l'on peut dire, il faut donc qu'ils modélisent des activités fonctionnelles gardant toujours en elles-mêmes un *sens biologique*[7].

---

[1] "a functional model-system", [Heinmets, F., 1969], p. 164.
[2] "disorganized state", [Heinmets, F., 1969], p. 164.
[3] [Heinmets, F., 1969], préface, p. v.
[4] "In order to understand the functional behavior of the total system, the integration of information from various subsystem is essential", [Heinmets, F., 1969], préface, p. v.
[5] [Heinmets, F., 1969], préface, p. v.
[6] "For this purpose model-systems have to be developed. These must contain sufficient number of functional units and reveal interactions between these units so that functionally meaningful properties are exhibited by the model-system", [Heinmets, F., 1969], préface, p. v.
[7] Cet argument n'est pas sans rappeler celui que l'on retrouvera quatre ans plus tard sous la plume du biométricien français Jean-Marie Legay, mais, il est vrai, sous une forme déjà bien moins restrictive, notamment quant au modèle théorique [Legay, J.-M., 1973a], pp. 61-63. Il y a en effet selon Legay deux façons de construire un modèle : soit de haut en bas (modélisation descendante ou *top-down* disent les anglo-saxons), de la théorie à la situation concrète, soit de bas en haut (modélisation ascendante ou *bottom-up*), de la situation concrète à la théorie. Pour le premier cas, s'il faut reconnaître le droit du mathématicien à s'affranchir un certain temps de tout souci de réalisme, il faut tout de même veiller à ce que le modèle théorique puisse, au final, posséder une interprétation concrète, c'est-à-dire un sens biologique. Pour le deuxième cas (et c'est là que la parenté avec l'argument de Heinmets est la plus forte), partant d'observations concrètes singulières et donc *a priori* nécessairement signifiantes d'un point de vue biologique (ce qui peut justement être contesté), il faut veiller à ce que le « construit » obtenu à partir de l'intégration de ces situations

Derrière ce postulat méthodologique, il y a la croyance que le sens ne peut venir de l'intégration du non-sens. C'est donc une limitation fondamentale, valant pour toute espèce de formalisation en biologie. Dans cette perspective épistémologique, on comprend mieux la réticence qui a d'abord été la sienne, comme d'un certain nombre d'autres physiologistes, face aux propositions contemporaines, déjà bien avancées, des calculateurs numériques : dans un calculateur numérique, le traitement discrétisé que subit tout calcul (même analytique) neutralise et égalise impitoyablement chaque étape du calcul. La discrétisation semble ainsi faire violence à ce que l'on pourrait appeler le postulat de la conservation de la signification au travers même du découpage du modèle intégrateur en unités modélisatrices. Le numérique, par le pas à pas de son traitement, rend égales donc également insignifiantes les étapes que pourtant il intègre bien les unes aux autres. Cette déperdition de signification risque bien d'être sans retour pour F. Heinmets. Or, c'est un risque qu'il ne semble pas vouloir prendre, même en 1969.

Il admet pourtant que sa solution est contestable et que l'issue devrait en être dans l'amélioration des calculateurs[1] mais à aucun moment il n'envisage de se porter explicitement vers la solution numérique alors même qu'il publie et connaît les travaux d'autres biophysiciens qui l'utilisent déjà. Ce point de vue qui consiste à vouloir contraindre le modèle à conserver constamment une analogie porteuse de « significations fonctionnelles », donc biologiques, à toute échelle n'a bien sûr pas été unanime et c'est bien souvent d'autres biophysiciens qui se sont lancés le défi du passage direct au numérique.

En effet, parmi les biologistes qui recourent tout de même assez vite aux calculateurs numériques, ce sont souvent ces mêmes chercheurs ou ingénieurs déjà aguerris aux techniques de simulation analogique, comme Britton Chance par exemple ou son collègue David Garfinkel. Cela leur est conceptuellement assez aisé dans la mesure où ils possèdent souvent des compétences en physique et en électronique. Certains de ces biophysiciens et physiologistes sont ainsi les premiers à passer aux calculateurs numériques. Toutefois, au-delà même des préférences épistémologiques du type de celles de Heinmets, ce choix de passer de l'analogique au numérique est généralement lent et ne fait pas immédiatement l'unanimité[2] parce que les obstacles de principe paraissent longtemps très éloignés de l'utilisateur physiologiste au regard des avantages pratiques immédiats que présente l'analogique, surtout dans le cas de problèmes formalisés par des équations différentielles simultanées. Mais un des arguments qui finit souvent par prévaloir, notamment en biochimie, est bien essentiellement pragmatique : à partir du moment où les formulations des systèmes étudiés deviennent plus complexes (en nombre de paramètres, de variables et de boucles) et que le traitement de telles formulations dépasse la taille physique

---

concrètes particulières ait lui-même une signification biologique : « Ce n'est pas parce qu'on construit à partir d'éléments définis dans la pratique, ayant un sens dans la pratique, qu'on est sûr d'obtenir un modèle qui ait lui-même un sens. Il faut aussi que les relations appliquées aux éléments choisis aient elles-mêmes un sens dans la pratique. Sinon les modèles construits pourraient correspondre à une situation expérimentale inexistante ou inaccessible », *ibid.*, p. 63. Legay insiste donc lui aussi sur ce principe de la *conservation de la signification biologique* à travers les différentes étapes du modèle mais en s'inquiétant davantage, en ce qui le concerne, pour le sens des relations formelles que l'on choisit de faire intervenir entre les sous-modèles signifiants.

[1] "As a matter of fact, in a system containing so many rate constants and variables, the most probable state is a disorganized state. Only by selecting specific rate constant values and initial conditions is it possible to obtain a functional system […] Consequently, quantitative study of the biological systems is extremely difficult and new computer techniques must be developed", [Heinmets, F., 1969], p. 164.

[2] Sur cette question qui dépasse le seul cadre de la biologie mathématique, voir [Rammuni, G., 1989], pp. 26-33. Malgré la supériorité de principe du numérique sur l'analogique, démontrée très tôt par Shannon (en 1941 pour la vitesse limitée du calcul analogique, voir *ibid.*, p. 33) et par von Neumann (en 1951, pour la précision limitée du calcul analogique, voir [Neumann (von), J., 1948, 1951, 1996], pp. 72-73), tout au long des années 1960, un grand nombre d'exemplaires de la revue américaine *Simulation* vont périodiquement se faire l'écho de ce débat. En 1969, M. Pring, un biochimiste du Balliol College d'Oxford, fait encore une comparaison détaillée des deux types de calculateurs [Pring, M., 1969], p. 88.

d'un « calculateur analogique raisonnablement dimensionné »[1], les chercheurs optent souvent pour le numérique. Ils font ce choix dans la mesure également où des calculateurs plus accessibles et plus aisés d'utilisation voient le jour sur le marché, au début des années 1960.

La neurophysiologie, pour sa part et comme on le sait par ailleurs[2], est très tôt bouleversée, non pas tant par l'usage direct des calculateurs numériques mais par les modèles épistémologiques, les paradigmes que ces calculateurs représentent en eux-mêmes[3]. Les calculateurs numériques continuent ainsi de valoir en eux-mêmes comme modèles (puisqu'ils avaient été eux-mêmes sciemment conçus sur le modèle neurologique supposé du cerveau) en pénétrant assez largement, mais au niveau conceptuel et théorique, dans les problématiques neurophysiologiques.

Dans ce cadre-là, la biochimie, la physiologie du métabolisme, l'écologie ou la dynamique des populations, considérant un vivant ou une population de vivants comme « l'usine chimique la plus complexe »[4], ou comme l'analogue d'un « système cybernétique »[5] stationnaire mais ouvert car soumis à des *flux* entrants et sortants, elles peuvent par la suite tout naturellement s'adjoindre les techniques de formalisation mathématique et de résolution de la recherche opérationnelle, déjà éprouvées auparavant dans la logistique et les sciences de la conception[6]. Ainsi en est-il par exemple des techniques mathématiques de recherches d'optimum par un algorithme pas à pas[7].

En outre, le fait qu'au début des années 1960, des biologistes et des écologues eux-mêmes font désormais effectuer le calcul de ce type de problèmes de flux ou de réseaux trophiques par des calculateurs numériques, et non plus seulement les économistes, va inciter les chercheurs universitaires ou les constructeurs à mieux adapter les langages évolués comme FORTRAN ou ALGOL, trop tournés vers les formulations arithmétiques et logiques, vers des langages dits de simulation comme GPSS[8], SIMSCRIPT[9] ou SIMULA[10], ou encore DYNAMO[11] (en sciences économiques et de gestion) davantage tournés vers le traitement direct et intuitif des flux, des boucles et des stocks[12]. Remarquons ici que, dans cette évolution, il y a une très intéressante inertie des formalismes qui s'exprime. Car, au delà de la rénovation des outils de calcul, dans cette volonté durable de faire simuler par le calculateur numérique un simple calculateur analogique, mais sur-dimensionné, les biologistes, comme les économistes ou les gestionnaires, expriment une remarquable constance dans leur souci de formaliser. Les écologues et les physiologistes,

---

[1] "reasonably sized analog computers", [Garfinkel, D., 1965], p. 112.

[2] Cette histoire est assez bien connue. Elle a en effet très tôt intéressé, pour des raisons philosophiques qu'il serait intéressant d'élucider, aussi bien les historiens que les philosophes des sciences. Voir par exemple [Gardner, H, 1985, 1993] et [Dupuy, J.-P., 1994, 1999]. À ce domaine-là, on peut même rattacher quelques uns des travaux de Canguilhem dont [Canguilhem, G., 1955]. Voir également les diverses généalogies existantes pour la neurobiologie ou les sciences cognitives : [Vignaux, G., 1991], [Andler, D., 1992], [Pélissier, A. et Tête, A., 1995], mais aussi bien sûr [Neumann (von), J., 1958, 1996] et, en particulier, l'historique de Dominique Pignon, publié dans ce dernier ouvrage : « Von Neumann et les machines molles », pp. 83-124.

[3] Notamment à partir de la parution en 1943 de l'article de McCulloch et Pitts [McCulloch, W. S. and Pitts, W., 1943] et des conférences Macy.

[4] [Dantzig, G. B., 1965], p. 33.

[5] [Grodins, F. S., 1965], p. 135.

[6] [Dantzig, G. B., 1965], p. 39.

[7] [Dantzig, G. B., 1965], p. 41.

[8] Le *General Purpose System Simulation language* est créé par IBM pour les 7090 en 1961. Voir [Naylor, T. H., Balintfy, J. L., Burdick, D. S. and Chu, K., 1966], p. 308.

[9] SIMSCRIPT est créé par la Rand Corporation en 1962, [Naylor, T. H., Balintfy, J. L., Burdick, D. S. and Chu, K., 1966], p. 308.

[10] SIMULA est apparu en 1964, comme une émanation d'ALGOL, [Lévènez, E., 1999], p. 2.

[11] DYNAMO est créé en 1963, au MIT, par l'équipe de Jay Forrester, [Naylor, T. H., Balintfy, J. L., Burdick, D. S. and Chu, K., 1966], p. 309.

[12] Pour l'historique circonstancié et une comparaison de GPSS, SIMSCRIPT et DYNAMO, voir [Naylor, T. H., Balintfy, J. L., Burdick, D. S. and Chu, K., 1966], chapitre 7, pp. 239-309.

comme les économistes, ont donc plutôt été d'abord animés d'un réflexe conservateur par rapport à la remise en question des formalismes que permettait pourtant le développement du calculateur numérique.

Toutefois, comme on l'a vu en génétique des populations, le traitement par calculateur numérique des équations différentielles non solubles analytiquement peut aussi inciter à employer la méthode récemment mise en œuvre en physique nucléaire avec les travaux de von Neumann, Metropolis et Ulam : la méthode de Monte-Carlo[1]. C'est là rejoindre un des nouveaux formalismes de la physique entre-temps très vite repris par la recherche opérationnelle[2]. Or, c'est une méthode ambivalente : elle peut être traitée comme une pure technique mathématique de résolution approchée, comme les biologistes, les écologues ou les généticiens[3] la considéreront d'abord en conformité avec leur conception des formalismes, ou comme un moyen de modéliser de manière réaliste, c'est-à-dire en simulant les phénomènes globaux à partir des micro-phénomènes. C'est la tendance à suivre jusqu'au bout cette deuxième interprétation que nous évoquerons plus bas au titre du quatrième type d'usage.

Deuxième usage : l'analyse statistique et la morphométrie

L'analyse statistique et, plus spécifiquement, la morphométrie ou morphologie statistique proposent de « mesurer » et de comparer les formes du vivant ou, plus largement, ses caractères morphologiques, dans leur évolution et dans leur répartition. Ce qui doit nous surprendre à première vue est le remarquable essor de la morphométrie dans l'après-guerre. On peut voir à cela deux raisons majeures en rapport avec notre propos. D'une part, elle bénéficie des méthodes de mathématisation descriptive développées avant-guerre par Fisher et ses successeurs dans un contexte génétique puis agronomique et que nous avons partiellement rappelées. Surtout, elle profite des raffinements conceptuels apportés entre-temps par le statisticien M. S. Bartlett avec sa proposition d'une analyse multivariée (1947)[4]. D'autre part, elle bénéficie de la mise à disposition progressive des calculateurs numériques que lui sont les *computers*. Et nous allons ici nous interroger un peu plus avant pour comprendre cette étonnante pré-adaptation entre une mathématisation descriptive et une machine conçue au départ pour calculer de façon arithmétique.

Dans un premier temps donc, un peu avant que les ordinateurs ne soient à disposition, c'est-à-dire à partir de la fin des années 1940, le développement systématique de l'analyse multivariée donne un nouveau souffle à cette approche dans la mesure où des outils conceptuels plus complexes peuvent arracher la taxonomie descriptive de sa dépendance aux choix subjectifs des caractères distinctifs entre genres, espèces et variétés[5]. Une telle analyse fondée sur la mesure des caractères morphologiques, et donc sur leur quantification, se présente directement à l'époque comme une prolongation mathématisée de l'anatomie comparée et de la paléontologie

[1] Pour un exemple d'une telle mise en œuvre dans le cas d'un transport cinétique d'électron dans la mitochondrie, voir [Pring, M., 1969], pp. 79-85. Pour la restitution historique détaillée de l'émergence de cette méthode en physique nucléaire, voir [Galison, P., 1996] et [Galison, P., 1997].

[2] Voir [Naylor, T. H., Balintfy, J. L., Burdick, D. S. and Chu, K., 1966], chapitres 3 et 4. Ces chapitres sont consacrés aux méthodes de résolution de modèles mathématiques par variables aléatoires.

[3] L'historien des sciences M. R. Dietrich a étudié le revirement significatif du généticien Kimura à ce sujet. Voir [Dietrich, M. R., 1996]. La méthode de Monte-Carlo est d'abord conçue par Kimura comme une méthode d'approximation puis comme un modèle plus réaliste que le modèle continuiste des gènes.

[4] Son article fondateur "Multivariate Analysis" paraît dans le *Journal of the Royal Statistical Society* en 1947. Voir [Bartlett, M. S., 1965], p. 223.

[5] [Blackith, R. E., 1965], pp. 225-226.

quantitative telles qu'elles existaient déjà dans les années 1920 et 1930[1]. Fisher lui-même, dans un article de 1936[2], avait indiqué les possibles usages taxonomiques de son approche statistique de l'expérience. La morphométrie procède en effet à des caractérisations réputées plus objectives dans la mesure où elle tâche de quantifier les dénominations qualitatives : elle remplace, quand elle le peut, des distinctions qualitatives par des différenciations quantitatives ou, à tout le moins, par des différenciations ordonnées en des échelles factorielles. Dans tous les cas, il s'agit donc soit d'une énumération, soit d'une mesure. Dans ce cadre, au cours des années 1950, le support du calcul reste essentiellement arithmétique[3]. Cette recherche d'objectivité par la mesure et par la médiation, autant que possible, d'un instrument formel qui puisse neutraliser les projections subjectives de l'observateur était déjà le fait de la psychologie expérimentale du tournant du siècle. Mais c'est essentiellement le statisticien M. S. Bartlett du *University College* de Londres qui a travaillé au développement de l'analyse multivariée et à ses applications en morphométrie, notamment à la suite des travaux en analyse multifactorielle du psychologue américain C. Spearman[4], mais aussi bien sûr à la suite des recherches en analyse statistique et biométrie de son collègue R. A. Fisher. Bartlett définit la statistique multivariée comme « l'étude de plusieurs variables en même temps dans le but d'augmenter soit l'efficacité de l'analyse statistique, soit la puissance de l'interprétation »[5].

Comme dans l'analyse statistique appliquée à l'agronomie, le but du développement de ces outils conceptuels en biologie a en fait essentiellement été d'augmenter le pouvoir de discrimination entre des groupes d'individus présentant tous une collection de propriétés métriques (ou métriquement exprimables) à des degrés variables. Venant donc au départ de la biométrie eugéniste anglaise, puis de la psychométrie, ces techniques ont été très vite utilisées dans le domaine du diagnostic médical[6]. Dans la morphométrie, en particulier, il y a bien le projet de représenter quantitativement les caractères des êtres vivants à commencer par leurs formes ou plutôt par leurs caractères morphologiques. Mais, là encore, l'objectif de cette application de l'analyse multivariée à la taxonomie n'est pas du tout de représenter un individu en tant que tel mais plutôt la distance entre les individus en vue de leur discrimination : ce sont les relations entre des caractères un à un homogènes qui sont mathématiquement traitables en des termes métriques mais pas l'hétérogénéité de l'individu à lui-même, de ses parties ou de ses formes entre elles, ou de ses parties avec son organisme entier. Comme en biométrie, l'approche est donc d'emblée relationnelle, métrique et apparemment purement descriptive. La morphogenèse de l'individu n'y est pas traitée en tant que telle. S'y ajoute cependant un but précis : phylogénétique.

Avec ce but classificatoire, la morphométrie rencontre une autre tradition qui n'est plus seulement à visée descriptive mais qui cherche des représentations mathématiques *en vue* d'explications phylogénétiques. Il faut bien comprendre ici que ces représentations mathématiques de distances métriques entre des caractères diversement présents ne deviennent pas pour autant *en elles-mêmes* explicatives mais des chercheurs comme R. E. Blackith, du département de zoologie de l'Université de Melbourne, prétendent toutefois les faire directement *servir à* une

---

[1] Voir le chapitre sur « L'anatomie comparée et la paléontologie des vertébrés » de J. Piveteau *in* [Taton, R., 1964, 1995], pp. 716-723.
[2] "The use of multiple measurements in taxonomic problems" paru dans les *Annals of Eugenics* de Londres en 1936. Voir [Bartlett, M. S., 1965], p. 223.
[3] Au début des années 1990, la morphométrie connaîtra justement une avancée majeure avec la proposition alternative d'une morphométrie géométrique. Voir l'état des lieux dressés en 2000 par Michel Baylac, morphométricien au CNRS (GDR 247), sur le site de son groupe de recherche : http://gdr-mef.univ-lyon1.fr/etat2.html.
[4] À partir de 1904, voir [Langlois, A. et Phipps, M., 1997], p. 6.
[5] [Bartlett, M. S., 1965], p. 201.
[6] [Bartlett, M. S., 1965], p. 202.

interprétation théorique et explicative. Or, dans ce cadre-là, les avatars de la morphométrie dépendent bien sûr intégralement du grand débat amplement étudié par ailleurs[1] et qui oppose la génétique quantitative, avec son hypothèse d'une évolution graduelle, et la génétique mendélienne, avec sa théorie des mutations brusques et discontinues.

Pour le morphométricien, les mathématiques sont essentiellement une technique de mesure. L'approche logique et classificatoire reste une métrique dégénérée aux yeux de l'axiomatique implicite du biométricien. Elle ne nous oriente de toute façon nullement vers une explication selon lui. Comme elle est essentiellement inféodée aux objectifs de la taxonomie et aux problématiques phylogénétiques, la morphométrie des années 1940 et 1950 sert encore comme un outil statistique dédié à une approche plutôt phylogénétique qu'ontogénétique. De plus, comme ce sont des *relations* entre des formes homogènes qui sont de fait objectivées dans la mathématisation statistique et non la *forme* des êtres vivants, en eux-mêmes, pris séparément dans leur histoire et chacun comme un tout, la morphométrie s'est développée très aux marges d'une autre approche morphologique quantitative et qui s'est au contraire prétendue d'emblée théorique et explicative.

Ainsi, le deuxième usage de l'ordinateur qui se répand rapidement est bien évidemment celui de l'analyse de données. Car, on l'a compris, il s'agit là essentiellement de traitements de données numériques en très grand nombre. Dans ce cadre-là, puisqu'on a toujours affaire à des quantités discrètes de données, on peut comprendre que l'utilisation des calculateurs numériques n'y ait même pas été le plus souvent précédée par celle des calculateurs analogiques. Le caractère numérique du *computer* lui sied très bien. En revanche, il faut que les biométriciens et les morphométriciens s'adaptent très vite au calculateur numérique ; mais ils avaient déjà auparavant recours à des machines à calculer électromécaniques (arithmétiques) et les langages évolués facilitent la maîtrise de l'outil dès le début des années 1960.

Notons, pour finir sur ce point, que l'intérêt des biologistes en ce domaine recoupe clairement celui des statisticiens de l'économie et des affaires qui avaient été auparavant à l'origine des travaux de Hollerith mais aussi de la naissance d'IBM[2]. Le transfert de formalisme ne semble pas poser de question dans la mesure où l'on reconnaît les statistiques comme appartenant à une mathématique de la surface, une mathématique descriptive et non fonctionnelle ou explicative. Le choix pour le calculateur numérique peut sembler donc évident à ce moment-là dans ce que Rashevsky appelait la « biologie quantitative » : les capacités de traitement et de stockage du calculateur numérique sont inappréciables en ce qu'elles soulagent des fastidieux et répétitifs calculs numériques. Dans l'ensemble, les langages évolués comme FORTRAN[3] et ALGOL permettent d'ailleurs d'implémenter utilement et convenablement les formules de l'analyse multivariée comme les tests statistiques, puisque les mathématiques algébriques et arithmétiques ainsi que quelques fonctions transcendantes y sont prises en compte grâce à des tabulations directement mises en mémoire dans le calculateur.

---

[1] Voir [David, P. et Samadi, S., 2000], pp. 289-291 et [Gayon, J., 1992], pp. 334-365.

[2] [Pratt, V., 1987, 1995], p. 164.

[3] Rappelons que le FORTRAN avait été conçu par IBM pour « traiter de manière synthétique les formules mathématiques et les expressions logiques et pour faciliter les opérations d'entrée et sortie et l'écriture des instructions de contrôle du programme », [Rammuni, G., 1989]. [Naylor, T. H., Balintfy, J. L., Burdick, D. S. and Chu, K., 1966] rappelle cette même liste du cahier des charges de FORTRAN en y ajoutant toutefois le désir de faciliter la « formulation des spécifications » ["*specification statements"*] des données et variables, pp. 242-243. En conséquence de toutes ces caractéristiques, il le classe dans les *General Purpose Languages.*

Troisième usage : le traitement de données non numériques ou traitement d'informations

Le troisième usage du calculateur numérique dans les sciences de la vie est celui du traitement de données non numériques. R. S. Ledley donne comme premier exemple l'analyse de chaînes d'acides aminés par calculateur telle qu'elle est intervenue en biochimie des protéines[1]. Une protéine est en effet construite comme une chaîne séquentielle de diverses espèces d'acides aminés qu'il faut identifier puis situer sur la chaîne protéique relativement aux autres acides aminés, un peu comme des lettres dans un mot. Or, les seules expérimentations de chimie organique possibles sur cette protéine conduisent à divers types de ruptures intervenant à divers endroits de la chaîne. Ces expérimentations étant en grand nombre, les sous-produits de ces réactions sont très nombreux également, puisqu'ils sont des fragments eux-mêmes inanalysés. En codifiant chaque acide aminé par une lettre, on a la possibilité de laisser à l'ordinateur le loisir de synthétiser et de tester empiriquement, mais virtuellement, toutes les chaînes protéiques qui rendent possibles les quelques expérimentations de rupture accessibles et réellement faites. Il s'agit donc là d'une forme d'analyse logique par synthèse reconstitutive, formellement réaliste (non mathématiquement abstractive puisque chaque acide aminé est représenté univoquement par un caractère alphanumérique 'A' ou 'B') et hypothétique. C'est ici la possibilité de concaténer selon des règles logiques des données non numériques qui est mise en œuvre dans le calculateur. On conçoit bien que ce type de problème combinatoire, et non numérique en ce sens, s'apparente davantage à la simulation d'une activité que l'on pourrait dire « intelligente » car mettant en œuvre, face à des données faiblement formalisées, un procédé qui ne relève pas immédiatement du calcul déterministe mais de la procédure heuristique classique essai/erreur.

Ledley donne comme deuxième exemple de traitement de données non numériques le cas du traitement d'image microphotographique, comme la microphotographie d'un chromosome, d'un axone ou de cellules sanguines[2]. Rappelons qu'à l'époque, la biologie cellulaire travaille très souvent à établir les karyogrammes des êtres vivants, cette caractérisation chromosomique ayant de nombreuses applications utiles : non seulement dans le diagnostic de certaines maladies mais aussi en amélioration des plantes dès lors qu'il s'agit par exemple de déterminer la ploïdie des espèces que l'on souhaite hybrider. Le calculateur numérique peut servir dans ce cas à la reconnaissance du type de chromosome en question et à la mesure précise de ses bras par exemple. Il a ainsi une fonction de reconnaissance qui ne s'appuie pas d'abord sur des techniques statistiques de tests mais plutôt sur des suivis complexes (et *a priori* non formulables analytiquement), et pas à pas, des contours d'objets en vue d'une reconnaissance de formes qui soit aussi une caractérisation numérique pour cet objet et pas seulement une discrimination par rapport à d'autres.

L'image est pour cela d'abord convertie (scannée) en un tableau bidimensionnel de nombres entiers déterminés en fonction des tons de l'image au moyen d'un convertisseur analogique-numérique. Ce tableau est ensuite mémorisé. Pour reconnaître et caractériser automatiquement les contours des objets photographiés, ce tableau est systématiquement parcouru par ce que les chercheurs de la *National Biomedical Research Foundation* appellent un « cafard » [« *bug* »][3] de telle sorte qu'il passe à la case voisine qui a le ton le plus proche de celle qu'il occupait précédemment. Cela dessine un parcours dans ce tableau bidimensionnel qui discerne et situe effectivement les formes photographiées. Les vecteurs qui relient les points de ce

[1] [Ledley, R. S., 1965], pp. 271-276.
[2] [Ledley, R. S., 1965], p. 277.
[3] [Ledley, R. S., 1965], p. 279.

parcours dans le tableau peuvent ensuite être analysés entre eux par des procédés mathématiques élémentaires inspirés de l'analyse et de l'algèbre et praticables en FORTRAN (produits scalaires, projections…) : sont-ils parallèles ? Y a-t-il une rotation et, si oui, dans quel sens ?, etc. Ce calcul permet de discriminer des formes élémentaires : en U, en S, en ligne droite… Un certain ordre de concaténation de ces formes élémentaires correspond à la forme précise d'un chromosome (en X). Enfin, une fois reconnu et situé automatiquement, on peut dimensionner ce chromosome, c'est-à-dire le caractériser métriquement, si l'on connaît le taux de grossissement de l'image.

À travers ce procédé dans lequel le calculateur conserve une image de l'objet étudié, il y a donc la possibilité de caractériser numériquement des compositions de courbures et de formes élémentaires qui ne pourraient l'être mathématiquement. Le manque de modèle mathématique simple et abréviatif pour la description des formes complexes est donc ici pallié par une analyse d'image « à vue » et pas à pas, c'est-à-dire élément d'image par élément d'image. Il n'y a donc pas de modèle mathématique quantifié et abréviatif qui soit sous-jacent au procédé de parcours. Il y a seulement des règles logiques ou heuristiques de parcours de données numériques. Ces règles logiques sont censées reprendre intuitivement les règles que le regard humain suit devant une forme nouvelle, devant une forme à laquelle il ne s'attend pas, et qu'il ne peut anticiper. C'est donc une approche purement empirique, beaucoup plus empirico-inductive qu'hypothético-déductive, bien que, au final et malgré tout, il y ait des « modèles » de séquences de vecteurs qui permettent de reconnaître des types de formes élémentaires. Cela est dû au fait que l'on cherche finalement à pouvoir tenir quand même une sorte de discours sur ces séquences de formes élémentaires et qu'ainsi une *re-connaissance* s'opère bien au moins au niveau de la forme globale.

Le calculateur numérique a ainsi le pouvoir de caractériser ce qui n'a pas encore de sens, c'est-à-dire pas de forme substantielle. Du moins permet-il de disjoindre l'étape de la caractérisation d'une forme de l'étape de sa reconnaissance. Et il établit ainsi une passerelle entre l'analyse d'image et le traitement purement syntaxique et structural (donc non sémantique) de signaux tel qu'il intervient dans la théorie de la communication de Shannon.

Le quatrième usage : la simulation numérique représentative

Le quatrième usage est beaucoup moins inductif que ce dernier. Il ne frôle pas du regard les objets ; bien au contraire, il prétend en présenter une reconstitution intrinsèque. C'est l'esprit de la simulation constructive et à prétention au moins heuristiquement réaliste. En biologie, venant de la lecture atomistique des simulations de type Monte-Carlo et déjà naturellement présente chez certains physiciens nucléaires dès les années 1940, comme nous l'avons vu, cette interprétation s'est rapidement et assez naturellement imposée dans la génétique des populations où l'on peut choisir de donner intuitivement du poids à l'individu (comme en démographie humaine), mais aussi dans le secteur de la biochimie, le biochimiste étant souvent, pour des raisons au moins méthodologiques, un substantialiste de la molécule. Ainsi, dans le contexte d'une réflexion sur les cas où la loi classique d'action de masse ne s'applique pas[1] et qu'il a mené avec Britton Chance à partir de 1961, le biochimiste David Garfinkel écrit-il :

[1] Cette loi n'est pas aussi simplement suivie quand la solution chimique est limitée par des membranes. Toutefois, sa formulation nouvelle peut être elle aussi exprimée en termes d'équations différentielles, mais dans ce cas, selon Garfinkel, « le nombre d'équations nécessaires est trop grand », [Garfinkel, D., 1965], p. 296.

« Un programme pour traiter cette situation a été préparé par J. D. Rutledge, P. Markstein et D. Irving (non publié)[1]. Il représente les molécules individuelles dans la mémoire du calculateur, et, dans ce cas, l'IBM 7090 a été utilisé à la place de l'UNIVAC I et II à cause de la mémoire limitée de ces derniers […] Au lieu d'écrire des équations différentielles, ce programme installe dans la mémoire du calculateur lui-même un tableau de nombres représentant les molécules, chacune dupliquée un nombre suffisant de fois, généralement 1000 fois, pour lisser le bruit statistique. Chacune de ces 'molécules' peut exister en autant d'états possibles nécessaires au traitement du problème particulier, jusqu'à une limite de 32 états différents. Quand une molécule est modifiée dans une réaction chimique, le numéro d'état qui lui correspond est modifié dans la mémoire. À partir des conditions existant à chaque pas de temps, la machine calcule les probabilités de toutes les réactions et transitions, et ainsi elle détermine si chacune intervient en tirant un nombre aléatoire. Elle enregistre tous les changements transformés en résultat et elle procède ensuite à la prochaine itération, calcule les probabilités, tire des nombres aléatoires, etc. »[2]

Ce passage fait suite au dessin du diagramme de flux [« *flow chart* »][3] du programme informatique valant pour le calcul des lois d'action de masse simultanées dans le cas de solutions chimiques diverses et complexes. Il est intéressant de remarquer que ce diagramme de flux a été appliqué à un programme sur UNIVAC I mais que la simulation a, pour sa part, clairement nécessité le passage du programme sur IBM 7090 à cause de limitations technologiques en mémoire. Il paraît clair en effet que la simulation moléculaire nécessite un dimensionnement maximal de la mémoire numérique. Et l'on peut imaginer que cette solution formelle se trouve par là directement en butte à la limitation technologique et financière afférente. Car Garfinkel insiste bien sur le fait que, dans le cas de la simulation numérique, les molécules sont individuellement « représentées » : pour une adresse de case mémoire, une molécule. Chance et Garfinkel n'ont d'ailleurs pas hésité à intituler l'un de leurs articles de 1962 « *Analogue and digital computer* representation *of biochemical processes* »[4]. Or, dans ce cas de représentation numérique, il n'y a pas de modèle mathématique à proprement parler. Les règles mathématiques se trouvent réduites aux lois de probabilités de réactions ou transitions. Elles sont elles-mêmes simulées par tirages de nombres pseudo-aléatoires. Garfinkel souligne l'intérêt d'une telle approche discrétisée et traitée par la méthode de Monte-Carlo : elle permet de traiter des problèmes de biochimie dans lesquels l'approximation que constitue en général la loi d'action de masse (valable dans les solutions parfaites) ne peut être utilisée. Il précise enfin que la simulation, dans les cas limites de solutions parfaites, permet toutefois de retrouver la loi d'action de masse. Autrement dit, la simulation semble avoir pour elle *une plus grande généralité* puisqu'elle s'applique dans tous les cas.

[1] Ce sont les ingénieurs programmeurs rattachés au Département de biophysique. Garfinkel indique qu'il se réfère à un de leurs manuscrits non publiés.

[2] "A program to deal with this situation has been prepared by J. D. Rutledge, P. Markstein and D. Irving (unpublished). It represents individual molecules in the memory of the computer, and in this case the IBM 7090 was used instead of the UNIVAC I et II because of the limited memory of the latter [...] Instead of writing differential equations this program sets up in the memory of the computer itself an array of numbers representing molecules, each duplicated a sufficient number of times, usually about 1000, to smooth out the statistical noise. Each of these 'molecules' may exist in as many possible states as are needed for the particular problem, up to a maximum of thirty-two. When a molecule is changed in a chemical reaction, the state number in the memory is changed correspondingly. From the conditions existing at any time, the machine calculates out the probabilities of all reactions and transitions, and then determines whether each one took place by taking a random number. It records all changes made as a result and then proceeds to the next iterations, to calculate probabilities, take random number, et cetera",[Garfinkel, D., 1965], pp. 295-296.

[3] [Garfinkel, D., 1965], p. 296.

[4] [Garfinkel, D., 1965], p. 309. C'est nous qui soulignons.

Garfinkel trouve cependant encore deux inconvénients majeurs à cette méthode de simulation numérique. Le premier est bien sûr économique comme nous l'avons vu : à titre d'exemple, son équipe a dû payer près de 5000 dollars en temps de calcul avant de mettre au point le modèle biochimique[1]. Le second est théorique : même s'il peut servir à tester une théorie, comme les règles de transition sont toujours elles-mêmes des simplifications de la réalité, une expérience de simulation sur calculateur numérique, elle aussi, doit toujours être au final « confirmée par des expériences réelles »[2].

Bilan : une évolution quantitative et une évolution qualitative dans les rapports de la biologie aux mathématiques

Pour finir sur ce tour d'horizon succinct, nous pouvons faire remarquer que l'émergence du calculateur numérique en biologie a causé en premier lieu deux types d'évolutions étroitement imbriquées :

- D'abord quantitative. Certains calculs lourds, concevables jusque là mais inenvisageables du point de vue pratique, devenaient accessibles en quelques heures ou quelques secondes. La masse des données que doivent souvent manipuler les sciences du vivant n'a donc plus suscité les mêmes reculades ou les mêmes stratégies d'évitement par l'abstraction prématurée ou la spéculation. La complexité du donné a pu être abordée avec beaucoup plus de générosité.

- Qualitative ensuite. En effet, dès le début des années 1960, un certain nombre de biologistes expérimentateurs considèrent que, grâce à ce nouvel instrument, la biologie peut atteindre le stade auquel elle tend depuis si longtemps : le stade empirique. C'est surtout les pratiques de simulation qui jouent selon eux ce rôle de faire franchir à la biologie cette étape décisive. Les simulations sont en effet conçues non comme des analyses, des dissections de données, mais comme des synthèses de données (ou plutôt de construits) à partir d'idéalisations sur les éléments ou micro-événements en jeu. Or, c'est une fonction intégrative et non plus d'analyse que l'ordinateur manifeste dans ces sortes d'usages. Alors que l'analyse de données travaille l'expérimenté pour lui faire avoir une valeur directement comparable et homogène au théorique, la synthèse de données travaille le conçu ou l'intuitionné parcellaire pour lui faire atteindre une valeur quasi-empirique. Ainsi la simulation permet-elle d'« explorer des myriades d'hypothèses scientifiques »[3] :

*« C'est seulement dans les dernières décennies que les sciences de la vie ont émergé d'un stade impressionniste et spéculatif pour aller vers un stade orienté empiriquement. Tandis qu'il y a des signes que ce nouveau point de vue mène déjà à des analyses théoriques (dont certaines sont hautement impressionnantes), la majeure partie des efforts bioscientifiques vont probablement demeurer empiriques encore quelque temps. L'ordinateur [*computer*] a clairement contribué à la « poussée » finale de ces sciences dans l'actuelle ère empirique, et, selon toutes probabilités, il va réduire le temps nécessaire à accumuler et synthétiser le grand nombre de données descriptives dont on aura besoin avant de pouvoir développer des théories adéquates. »*[4]

---

[1] [Garfinkel, D., 1965], p. 308.
[2] "confirmed by real experiments", [Garfinkel, D., 1965], p. 308.
[3] [Stacy, R. W. and Waxman, B., 1965], p. 3.
[4] "It is only in the last several decades that the life sciences have emerged from an impressionistic and speculative stage to one oriented empirically. While there are signs that this new point of view is already leading to theoretical analyses (some of which are highly impressive), the major bioscientific efforts are likely to remain empirical for some time. The computer has clearly contributed to the final 'push' of these sciences into the current empirical era and in all likelihood

Il y aurait donc bien une sorte de saut qualitatif chargé d'un fort enjeu pour la biologie : elle pourra fonder enfin son autonomie intellectuelle et pratique du fait de cet instrument nouveau. Mais cet avis est plutôt rare à l'époque. Et nombreux sont les biologistes théoriciens qui pensent que les avancées seront plutôt d'ordre théorique, que l'ordinateur présente plutôt une sorte de paradigme universel et suggestif. Cela est dû en effet à sa faculté étonnante de traiter tout type d'information, de faire modèle pour toute science, de transférer tout uniment non seulement des formalismes et des logiques mais des algorithmes. La biologie théorique trouverait ainsi à se fonder en fusionnant avec d'autres secteurs des sciences, tant de la nature que de l'homme, pour former comme une grande théorie des systèmes cybernétiques ou régulés[1]. C'est cette approche, d'origine indépendante et plus ancienne que le calculateur numérique, puisque développée chez L. von Bertalanffy avec les théoriciens des systèmes ou chez les théoriciens de l'information et de la régulation comme Henry Quastler[2], c'est-à-dire au cœur même d'une préférence pour les formalismes différentiels dès lors qu'ils semblent en effet se répondre et se confondre par–delà la diversité des objets d'étude, que l'émergence de l'ordinateur et de la cybernétique réveille cependant et met de nouveau en avant. Or, c'est bien cette perspective programmatique, unitaire et privilégiant le théorique, que semblent vouloir mettre en doute ceux qui préfèrent au contraire le caractère opérationnel que les modèles par ordinateurs donnent aux sciences du vivant, comme c'est le cas, on peut le comprendre, des biologistes et médecins du NIH.

Toutefois, en ce qui concerne la représentation formalisée de la morphogenèse, un certain nombres de biologistes théoriciens vont se sentir fortement menacés par les usages d'abord calculatoires et théoriques de la simulation : elle leur impose un changement de formalismes en même temps qu'un changement de statut épistémique pour le formalisme. La mathématisation mi-abstractive / mi-réaliste que savent manipuler les ordinateurs décontenance quelque peu ces mathématiciens de la biologie. Beaucoup vont décider que la simulation est une modélisation prédictive directement concurrente de la théorie parce qu'ils la jugent essentiellement et définitivement tournée vers le calcul approché. Elle doit être bannie, selon eux, parce qu'elle substitue à peu de frais le calcul insignifiant et mécaniste à la conception et à la compréhension effective des phénomènes. En tant que rivale de la théorie, elle ne serait pas de la bonne science. Ainsi, un front de résistance à la simulation va se développer dès les années 1950, notamment

---

will shorten the time necessary to accumulate and synthesize the vast amounts of descriptive data which will be needed before adequate theory can be developed", [Stacy, R. W. and Waxman, B., 1965], p. 3. En tant qu'éditeurs du livre collectif qu'ils dirigent Ralph Stacy (de l'université de Caroline du Nord) et Bruce Waxman (des *National Institute of Health*) signent tous les deux cette introduction.

[1] En voulant retracer les origines du programme de recherche dit de « vie artificielle », Philippe Goujon a procédé à un historique assez précis de ce versant informationnel de la biologie formalisée. Voir [Goujon, P., 1994a] et [Goujon, P., 1994b].

[2] Voir [Quastler, H., 1965], p. 332. Son propos principal y est justement de critiquer le réductionnisme mécaniste auquel l'usage de l'ordinateur semble entraîner un trop grand nombre de ses contemporains. Selon lui, il ne faut pas pouvoir espérer que tous les aspects pris en compte dans les modèles empruntés aux « théories des systèmes » soient testables par l'expérience. Il faut accepter le fait qu'il y ait toujours des « boîtes noires » (*ibid.*, p. 313) exerçant des fonctions dont on ne peut s'expliquer pourquoi elles les exercent. La simulation, pour sa part, explicite des éléments et stipule entièrement les règles de leurs interactions. C'est par son côté platement explicite, exotérique pourrait-on dire, que la simulation est et reste profondément mécaniste selon Quastler. Mais la modélisation des systèmes au sens de la « théorie des systèmes » conçoit au contraire des fonctions dont certaines sont à opacité irréductible. Or, selon Quastler, toute modélisation du vivant qui se veut correcte doit se faire à ce prix. Elle ne doit pas chercher à toutes forces l'interprétation jusque dans le détail analytique sous prétexte que cela la mènerait systématiquement au seuil d'un test empirique. Dit autrement : une modélisation systémique peut exprimer des choses sensées, sans avoir été totalement testée empiriquement. Et là résiderait sa force : "We have to accept the fact that results of systems theory approaches can be meaningful and interesting even if some of them are not amenable to analysis with the established methods", *ibid.*, p. 332.

avec Rashevsky, que l'on retrouve ici comme tête de file pour ce qui concerne la formalisation de la morphogenèse.

CHAPITRE 12 – La « biotopologie » du second Rashevsky (1954)

Après ce tableau des différents usages de l'ordinateur en biologie à la fin des années 1950 et au début des années 1960, focalisons de nouveau notre attention sur la mathématisation de la morphogenèse. Venons-en en particulier à l'aspect que prend, à cette époque, la biologie théorique des formes et à son refus persistant des modèles. Nous nous souvenons que Rashevsky, en 1954, avait immédiatement et favorablement réagi au contenu du premier article de son élève David L. Cohn en lui suggérant une légère modification de son « système » artériel simplifié. Or, dans le cadre de ces travaux, David Cohn suggérait l'idée que l'on remplace le principe biologique de « simplicité maximale », introduit dès 1945 par Rashevsky à des fins de représentation mathématique de la forme des vivants, par le « principe de conception optimale » (« *optimal design principle* »). Comme nous l'avons indiqué précédemment, en introduisant le terme de « conception » ou de « configuration » [« *design* »], David Cohn avait principalement pour but d'infléchir la méthode des « principes »[1] de son maître vers une méthode, propre à l'ingénierie, de planification pragmatique et de décomposition fonctionnelle des systèmes complexes.

La biologie mathématique des formes s'autorisait donc ainsi à ne plus tirer ses modèles physiques des seuls principes (ou théories) physico-chimiques, mais également des pratiques des sciences de l'ingénierie, plus concrètes, selon les termes mêmes de Cohn, comme l'hydraulique ou l'électrodynamique. Ce faisant, parce qu'il le cite longuement dès la première page de son premier article de 1954, Cohn attire l'attention de Rashevsky sur un passage de Waddington dans lequel ce dernier appelle de ses vœux la naissance d'une sorte de « topologie biologique » apte à rendre compte des changements d'ordres de complexité intervenant dans l'embryogenèse et la morphogenèse en général[2]. Or, cet accent sur la méthodologie de conception de systèmes équivalents, comme sur l'intégration mutuelle des fonctions organiques en un tout optimisable, a un effet de révélateur pour Rashevsky, mais pas directement dans le sens que préconise Cohn, qui est celui d'un retour au concret. Car le réductionniste qu'est alors Rashevsky est informé par ailleurs des approches par la logique booléenne de McCulloch et Pitts du système nerveux central (1943), comme des travaux contemporains des cybernéticiens tel Wiener (1948) ou des théoriciens des systèmes et de l'information comme Henry Quastler (1953) ou encore des théoriciens des automates comme von Neumann (1951)[3]. De plus, en cette année 1954, depuis la découverte de la structure en double hélice de l'ADN[4], la biologie expérimentale et moléculaire a le vent en poupe. Comme conséquence de cela, la biologie théorique aux Etats-Unis est au pied du mur : le *Committe on Mathematical Biology* de Chicago perd l'essentiel de ses crédits dès 1954[5]. Et la position académique de Rashevsky est grandement fragilisée.

---

[1] Dont nous avons montré qu'elle marquait une première inflexion dans l'épistémologie d'abord réductionniste de Rashevsky.
[2] Voir *supra*.
[3] Pour ces références explicitement assumées, avec leur date, voir [Rashevsky, N., 1955], p. 229 et [Rashevsky, N., 1960b], p. 144.
[4] Voir le récit personnel de J. D. Watson *in* [Watson, J. D., 1968, 2003]. Un récit de cette épisode faisant la synthèse de travaux de différents historiens des sciences est proposé par [Morange, M., 1994], pp. 139-155.
[5] Voir [Keller, E. F., 2002, 2003], p. 83. Evelyn-Fox Keller rappelle qu'en 1953, ce comité comprenait 30 membres. À partir de 1954, les crédits n'étant plus renouvelés, Rashevsky a dû réduire les projets de recherche de façon drastique. Jusqu'à sa retraite, Rashevsky ne travaillera plus qu'avec très peu de moyens.

C'est dans ce contexte mouvementé que Rashevsky opte pour un déplacement majeur de son épistémologie, non pas vers une intégration pragmatique des méthodes concrètes de l'ingénierie, mais vers la prise en compte préférentielle et abstractive des *relations organiques qualitatives* dès lors qu'il comprend que, désormais, *intégrer le qualitatif n'implique plus pour autant de renoncer à la mathématisation ni à la théorisation*. Pour lui, ceux qui, comme les cybernéticiens et les théoriciens de l'information, intègrent l'informationnel dans leur modèle de la biologie vont donc dans le bon sens. Et il les rejoint sur le tard par le biais de cette entorse qu'il avait déjà fait subir lui-même à son épistémologie réductionniste lorsqu'il préconisait l'introduction de « principes » biologiques axés sur le fonctionnel et susceptibles de permettre d'écrire des équations mathématiques sans que l'on dispose néanmoins d'une interprétation physico-chimique du processus représenté. De surcroît, et cela a dû être un argument non négligeable, le développement de cette approche plus abstractive et mathématique présente l'avantage de ne pas exiger trop de moyens financiers.

À partir de 1954, ce qui n'était qu'une entorse à sa première épistémologie réductionniste devient donc en fait le fondement de sa seconde épistémologie : relationnelle et qualitative. Mais, comme cela lui arrive souvent, et sans doute pour ne pas avoir à faire allégeance à l'école cybernétique qui lui paraît coupable de négliger ses véritables précurseurs dont lui-même[1], comme aussi par souci authentique de généralité, Rashevsky cherche là encore à montrer que l'approche informationnelle (et donc aussi cybernétique) n'est qu'un cas particulier de ce qu'il appelle l'approche « topologique »[2] qu'il invente d'un même geste. C'est dans un article fondateur, paru en 1954 dans le *Bulletin of Mathematical Biophysics*[3], qu'il exprime nettement et pour la première fois la nécessité d'une approche topologique en biologie mathématique. De fait, il relativise la nouveauté de la cybernétique en se l'assimilant.

L'emprunt à la « théorie des graphes » : une topologie graphique

À partir de 1954, Rashevsky considère que toutes les approches antérieures auxquelles il a lui-même longtemps participé en biologie mathématique étaient autant de constructions de « modèles physico-chimiques »[4] et que le moment est venu non pas de renoncer à cette façon de faire, car elle garde certains avantages, mais de lui adjoindre une approche axée sur les relations organiques qu'il qualifie de « qualitatives »[5]. Il est à remarquer que c'est à l'occasion de son changement de perspective épistémologique que le terme de « modèle » vient le plus souvent sous sa plume pour remplacer celui de « théorie ». Alors que, jusqu'en 1954, la physique devait être pour lui le terrain de base d'une intelligibilité théorique pour la biologie et ses principes, elle devient par la suite un simple réservoir de modèles. Pour Rashevsky, ce qu'il qualifie rétrospectivement de « modèle physico-chimique » garde toutefois le double mérite d'*expliquer* (« *explain* »)[6] les processus biologiques et de les *quantifier*, c'est-à-dire de les rendre

[1] Dans un article de 1968, il se plaît à minimiser l'apport de Wiener et à rappeler combien il lui semble qu'il l'a lui-même devancé sur bien des points, et ce dès les années 1930, notamment dans cette intuition consistant à apparenter formellement les systèmes organiques avec les systèmes artificiels de commande. C'est en particulier le cas de la notion de feedback positif qu'il aurait selon lui mise en évidence en neurobiologie dès 1938 sans que l'expression n'existe encore. Voir [Rashevsky, N., 1938], pp. 243-244.
[2] [Rashevsky, N., 1955], p. 229.
[3] "Topology and Life. In search of a General Mathematical Principles in Biology and Sociology", *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 16, pp. 317-348.
[4] [Rashevsky, N., 1964], p. 54.
[5] [Rashevsky, N., 1968], p. 245.
[6] [Rashevsky, N., 1964], p. 54. Mais « expliquer » ne suffit pas, comme il le précisera.

représentables par des métriques et donc testables et calibrables par l'expérience. Un modèle est intéressant pour lui si l'on se penche sur un cas particulier et si l'on veut en prédire quantitativement le devenir[1]. Mais ce qui lui apparaît manifestement à partir de 1954, c'est que, contrairement à ce qu'il croyait en 1938, cette activité de « théorisation » physicaliste, qui se révèle finalement être une activité de « modélisation », ne contribue pas du tout à faire naître cette partie fondamentale de la biologie mathématique qui devait être à la biologie mathématique globaliste de Lotka et Volterra ce que la physique statistique était à la thermodynamique. En 1954, Rashevsky ne croît donc plus que le fondement de la théorie biologique, c'est-à-dire d'une théorie du vivant, soit dans la physique. Sur ce point, il rejette la perspective physicaliste du premier Carnap et du Cercle de Vienne qui, un temps, avait été proche de la sienne.

Mais son désir de théorisation biologique ne disparaît pas pour autant et se reporte sur ce qu'il avait appelé dès 1944 les « principes » biologiques au contact des problèmes que lui posait la représentation mathématique de la morphogenèse. Pour Rashevsky, à partir de 1954, ce n'est donc plus le « physique » qui est fondamental en biologie, mais c'est le « principiel ». Son désir de fondement mathématique de la biologie demeure mais il est déplacé du « physique » au « principiel », parce que le « physique » est désormais réputé n'intervenir que dans une approche non-fondamentale de « modélisation » pragmatique et particulière des phénomènes biologiques. C'est la raison pour laquelle il ne s'inscrit pas en fait directement dans la filiation du relationnisme symbolique de Woodger. Nous avions certes déjà comparé le premier Rashevsky avec Woodger. Mais le second Rashevsky entretient un rapport différent avec l'approche axiomatique de son collègue britannique. Il en quête de principes biologiques qui ont une réalité effective et qui dessinent nettement car ontologiquement les frontières entre physique et biologie, alors que la préoccupation de Woodger est prioritairement logique voire linguistique[2]. L'essentiel d'une théorie biologique est son langage et sa construction axiomatique pour Woodger, alors que l'essentiel pour Rashevsky est ce à quoi cette théorie réfère, son référent ontologique. Ce qui peut donner l'impression que Rashevsky se rapproche alors de Woodger est le fait que le référent de sa théorie biologique soit en effet devenu plus abstrait en 1954 que dans sa période physicaliste. Mais Rashevsky n'en devient pas pour autant nominaliste ou logiciste. Il s'agit pour lui tout au plus d'une abstraction au sens de l'espace abstrait de Minkowski et de la théorie de la relativité générale d'Einstein, conceptions qu'il avait pratiquées, qu'il connaissait bien et auxquelles il se réfère fréquemment. En 1958, dans un chapitre intitulé « *The Geometrization of Biology* » et afin de justifier son recours à la mathématique nouvelle qu'est la topologie, il se plaît à citer en exemple ces travaux de physique théorique, cela au détriment de ses traditionnels appels (dans les années 1930) aux parallélismes entre physique statistique et biophysique mathématique[3].

C'est donc un nouveau domaine de la physique théorique qui sert désormais de modèle à sa biologie théorique mais non pas au sens où ce domaine serait la théorie d'un substrat ontologique commun à la physique et à la biologie mais au sens où il est un simple paradigme épistémologique. Enfin, sur le tard, Rashevsky admet finalement que c'est tout de même la génétique formelle des lois de Mendel qui manifeste la plus grande réussite dans la découverte de principes biologiques réellement autonomes et formalisables. À partir de 1954, après l'avoir longtemps ignorée, il va d'ailleurs constamment situer sa démarche comme voisine de la

[1] [Rashevsky, N., 1964], p. 54.
[2] Rashevsky cite lui-même un propos de Tarski à son égard : "The difference between Woodger's approach and yours is due to the fact that Woodger is interested in the logical, while you are interested in the biological aspects of the problems", [Rashevsky, N., 1964], p. 57.
[3] [Rashevsky, N., 1960a], Tome 2, pp. 404-405.

génétique formelle[1]. Cette dernière devient même, selon lui, une branche de la biologie mathématique. Mais sa spécialisation et son ancienneté relative devraient nous inciter à la traiter à part pour la nommer « génétique mathématique »[2]. Ainsi et *a posteriori*, le domaine d'étude auquel, selon Rashevsky, s'attachent les travaux de son équipe de Chicago rassemble tout ce qui, dans la biologie mathématique, n'appartient pas à la génétique mathématique. Ce domaine est quant à lui toujours en quête de principes biologiques autonomes comme de formalisations adaptées à ces principes.

Il est possible enfin que Rashevsky, dans son mouvement vers la formalisation topologique de la biologie, réponde également à cette époque à une incitation qui est née auparavant en psychologie, avec les travaux de Kurt Lewin parus en 1936 dans *Principles of Topological Psychology*[3]. Rashevsky n'a en effet jamais renoncé à traiter le monde organique comme un tout et ce peut donc être tout autant, si ce n'est davantage, ces travaux de psychologie que ceux de chimie organique de Denes König (voir encadré) qui le mettent, à ce moment-là, sur cette voie. Si, en 1954, Lewin peut contribuer à lui donner cette idée d'employer la topologie, le psychologue n'a alors pourtant recours à aucune des techniques mathématiques que la topologie récente met à sa disposition[4]. Ces techniques mathématiques de la topologie des années 1930, Rashevsky va donc les quérir d'abord chez König.

La théorie des graphes[5]

Dans un grand nombre de problèmes pratiques, on est amené à relier des entités (nombres, objets, lieux, villes, opérations, molécules…) les unes aux autres par des flèches ou arcs représentant des relations entre ces entités (une succession, une préférence, une route…). Depuis la formalisation commode du problème des sept ponts de Königsberg par Euler en 1736, on est convenu d'appeler « sommets » les entités représentées par les points, « arcs » ou « arêtes » les lignes qui les relient. D'après le mathématicien français Claude Berge, qui publiera un ouvrage de référence sur le sujet en 1958, le terme de « graphe » remonterait à l'ouvrage du mathématicien hongrois Denes König paru à Leipzig en 1936 : *Theorie der Endlichen und Unendlichen Graphen*[6]. C'est en tout cas cet ouvrage de König qui a contribué à signaler la généralité des problèmes de graphes telle qu'elle apparaîtra plus manifestement encore après la guerre, que ce soit en théorie des circuits électriques (avec les travaux antérieurs de Kirchhoff sur la matrice d'incidence[7] qui inspirèrent à Poincaré son « *analysis situs* » qui deviendra la topologie), en sociologie (avec les sociogrammes), en psychologie, en économie et gestion (diagrammes

[1] [Rashevsky, N., 1960b], p. 141.
[2] [Rashevsky, N., 1960b], p. 141.
[3] Cité *in* [Rashevsky, N., 1960a], Tome 2, pp. 308 et 324.
[4] [Rashevsky, N., 1960a], Tome 2, pp. 308-309.
[5] Pour ce rappel, nous nous inspirons grandement des introductions de [Berge, C., 1958, 1969], pp. vii-viii et de [Sache, A., 1974] (« Aimé Sache » = pseudonyme d'un groupe de chercheurs mathématiciens alors associés à la Maison des Sciences de l'Homme - MSH), p. 7, mais aussi de l'article « théorie des graphes » de Hervé Raynaud dans l'*Encyclopaedia Universalis*, édition 1989, Tome 10, pp. 737b-740b.
[6] *Théorie des graphes finis et infinis*, Leipzig, Akademische Verlagsgesellschaft, 1936. Cet ouvrage est cité comme source *princeps* par [Rashevsky, N, 1955], p. 235.
[7] [Berge, C., 1958, 1969], p. vii.

d'organisation), en recherche opérationnelle, etc. Dans son livre de 1936, König lui-même en proposait une application en chimie organique[1].

À la différence de l'analyse combinatoire qui, selon Berge, « ne s'intéresse guère aux notions non généralisables à n dimensions »[2], la théorie des graphes a pour caractéristique de se pencher sur des problèmes concrets où l'intuition peut constamment intervenir au moyen de dessins, cela afin de seconder la formalisation. La formalisation des graphes consiste en effet à définir des paires de sommets, des sommets successeurs puis prédécesseurs, des chemins, des circuits (chemins revenant sur eux-mêmes), des sous-graphes, des chaînes (ou séquences d'arcs), des cliques (ou sous-graphes complets c'est-à-dire des sous-graphes dans lesquels toute paire de sommets est reliée par un arc, ce terme de « cliques » venant des sociogrammes des psychologues[3]), des cycles, des arbres, des forêts, des tournois, etc. Un grand nombre de théorèmes plus ou moins triviaux peuvent y être alors démontrés. Mais certains problèmes demeurent bien sûr ouverts. Comme on peut le comprendre, le recours à des termes concrets (chemins, cycles, cliques, arbres, tournois…), bien que très courant en mathématique, y est moins artificiel que dans les théories plus abstractives dans la mesure où l'impulsion conceptuelle y est majoritairement venue de disciplines diverses et plus concrètement orientées[4].

Dans son article de 1954, Rashevsky propose donc une première approche topologique : par la théorie des graphes. Chaque fonction ou propriété biologique y est représentée par le sommet d'un graphe orienté[5]. C'est donc l'*organisation fonctionnelle* des organismes qui est l'objet principal de sa formalisation. Dans ce graphe, les arcs orientés représentent les relations binaires asymétriques de précession-succession entre les *fonctions biologiques* : « Ainsi le sommet I qui représente la propriété d'ingestion sera connecté par une flèche au point D qui représente la propriété de digestion, comme ceci : I → D. »[6] Par la suite, ayant représenté le fonctionnement global de plusieurs organismes de complexité variable par de tels graphes de précession-

[1] [Rashevsky, N, 1955], p. 231.
[2] [Berge, C., 1958, 1969], p. vii.
[3] [Sache, A., 1974], p. 16.
[4] Hervé Raynaud suggère que c'est d'ailleurs la raison pour laquelle la théorie des graphes s'est tout de même peu développée dans les mathématiques françaises, longtemps et fortement marquées qu'elles étaient par le formalisme bourbakiste. Voir l'article « théorie des graphes » *in Encyclopaedia Universalis*, Tome 10, p. 740b. L'entretien que Bernard Colasse et Francis Pavé ont mené avec Bernard Bru restitue par ailleurs assez précisément l'atmosphère de l'Institut Henri Poincaré qui avait été fondé en 1928 avec le projet de développer les mathématiques appliquées en France. Il confirme cette analyse. Autour de cet institut, en effet, de nombreux mathématiciens appliqués (dont Georges Darmois (1888-1960) - également directeur de l'Institut Supérieur de Statistiques de Paris fondé en 1922 - , Pierre Massé (1898-1987), Georges Th. Guilbaud (né en 1912), par ailleurs fondateur du Centre de Mathématiques Sociales (qui deviendra le CAMS) de l'EHESS, et André Vessereau, puis P. Rosensthiel, Bernard Roy (auteur d'un manuel sur la théorie des graphes en 1970) et Maurice Fréchet (1878-1973)) se retrouvèrent jusqu'à la mort de Borel, en 1956, date à partir de laquelle l'IHP fut vidé de sa substance et marginalisé par la vague bourbakiste, selon Bernard Bru. Voir [Bru, B., Colasse, B. et Pavé, F., 2002], pp. 77 et 87. Nous pouvons ajouter qu'au vu de ce paysage intellectuel français, les mathématiques appliquées, spécifiquement la Recherche Opérationnelle, mis à part le travail de traduction et d'acclimatation par Vessereau de la statistique anglo-saxonne à la Fisher en direction de la biologie et de l'agronomie après 1945, ont d'abord surtout été développées et enseignées à destination des ingénieurs gestionnaires et des chercheurs en sciences humaines, comme en témoignent les fondations de l'ISUP puis du CAMS. C'est essentiellement le CAMS, bénéficiant en quelque sorte des déboires de l'IHP, qui publie par la suite des travaux en théorie des graphes, notamment à la fin des années 1960 et au début des années 1970, dans la revue *Mathématiques et sciences humaines* (voir [Sache, A., 1974], p. 125). Mais ces travaux sont prioritairement adressés aux sciences humaines alors même que, par ailleurs, Jean-Pierre Benzécri coupe ce qu'il appelle l'« analyse de données » de ses impulsions statistiques et opérationnelles initiales (de par ses racines dans la recherche opérationnelle anglaise), en en faisant une présentation purement géométrique un moment très prisée. La biologie française, y compris la biométrie, est donc restée longtemps à bonne distance de ces développements de la mathématique appliquée, en particulier de la théorie des graphes.
[5] [Rashevsky, N., 1968], p. 245.
[6] "Thus the vertex I which represents the property of ingestion will be connected by an arrow to the point D which represents the property of digestion, like this I → D", [Rashevsky, N., 1968], p. 246.

succession, il est possible de faire apparaître des applications épimorphiques entre ces différents graphes, c'est-à-dire des applications (au sens de l'algèbre) où des relations d'un sommet à plusieurs sommets (« *one-to-many* ») peuvent être représentées[1]. C'est ce que Rashevsky appelle le « principe de l'épimorphisme biologique ». Ainsi, lorsqu'elle est stimulée, une paramécie peut se mouvoir vers une particule de nourriture, l'ingérer, la faire migrer dans sa vacuole digestive, la digérer et enfin excréter les éléments non assimilables. De même, un oiseau vole vers un insecte qu'il a vu, l'avale, le digère dans son système gastro-intestinal, assimile les produits de la digestion et défèque les matériaux indigestes. Les plantes, d'une certaine manière, suivent des cycles d'opérations fonctionnelles tout à fait similaires, selon Rashevsky[2]. Cela signifie qu'il existe des similarités qualitatives indépendamment des différents mécanismes physico-chimiques mis en œuvre ponctuellement pour assurer telle ou telle fonction : « Le mécanisme de stimulation et de perception de la nourriture chez une paramécie est assez différent du mécanisme de stimulation et de perception de la nourriture chez un oiseau ou chez un autre animal. »[3] Il y a donc des *mécanismes* entièrement différents d'un point de vue physique qui assurent des *fonctions* organiques comparables. C'est cette sous-détermination des mécanismes par les fonctions organiques et l'organisation mutuelle de ces fonctions que permet de prendre en compte l'approche qualitative en focalisant l'attention sur les relations entre les fonctions. Le biologiste théoricien se penche alors sur les applications épimorphiques qui laissent invariantes « certaines relations générales »[4] entre fonctions organiques. Rashevsky assume donc là cette sorte de déracinement du formalisme qu'il refusait encore avant l'intervention de la cybernétique en biologie quantitative et l'expansion afférente des modèles isomorphes.

L'approche topologique va finalement dans le bon sens pour Rashevsky parce qu'elle rend compte de la similarité qualitative entre les organismes. Elle lui permet de réaliser le projet qu'à la suite de Loeb et Lotka, il avait par ailleurs formulé dès 1948 de concevoir le monde organique (et donc avec lui aussi le monde sociologique et humain !) *comme un tout*[5]. Mais cela lui permet aussi et surtout de percevoir des principes uniques à l'œuvre dans tout organisme vivant. Parce qu'elle rend compte de l'unité du monde organique à travers sa diversité même, l'approche biotopologique se révèle finalement plus fondamentale que l'approche biophysique, même si elle ne la remplace pas :

« On doit insister fortement sur le fait que l'approche relationnelle de la biologie esquissée ci-dessus, ne supplante en aucune manière l'approche quantitative ou métrique *antérieure. Les deux sont également importantes en biologie. Négliger l'une ou l'autre serait une grave erreur. Cependant, on doit dire qu'à certains égards l'approche relationnelle est plus fondamentale. Elle*

---

[1] [Rashevsky, N., 1968], p. 246. On reconnaît là le souci qui avait animé également les recherches logicistes et d'embryologie théorique de Woodger. Rashevsky a-t-il repris ses remarques cruciales de Woodger (1937) en se les attribuant à lui seul sous prétexte de leur avoir donné une teinture topologique ? Il est certain que Rashevsky a lu Woodger très tôt, dès avant la guerre, mais il est tout aussi certain qu'il ne cite pas Woodger lorsqu'il introduit sa notion d'épimorphisme. Ce n'est que plus tard qu'il exprime quelque regret de n'avoir pas saisi plus tôt ces idées novatrices que lui proposait la méthode axiomatique. Nous n'avons pas de document permettant de savoir si, en 1954, Rashevsky tire directement cette idée de sa lecture antérieure de Woodger. Mais, selon ses dires, il n'aurait de toute façon pas alors prêté toute l'attention à ce travail qui lui sembla d'abord manquer d'un sens réellement biologique dans la formalisation symbolique.

[2] [Rashevsky, N., 1968], p. 245.

[3] "The mechanism of stimulation and of the perception of food in a paramecium is quite different from the mechanism of stimulation and perception of food in a bird or in another animal", [Rashevsky, N., 1968], p. 245.

[4] "certain general relations", [Rashevsky, N., 1968], p. 245.

[5] [Rashevsky, N., 1938, 1948], p. 616. Rashevsky y concevait la sociologie mathématique comme une sous-partie de la biologie mathématique, et l'histoire comme une petite branche de la paléontologie... Voir [Rashevsky, N., 1938, 1948], p. 629.

insiste sur l'unité de l'organisme aussi bien que sur le monde organique comme un tout, un fait que, jusqu'à présent tout au moins, l'approche quantitative ignore quasiment. L'approche métrique est plus à même d'insister sur les différences quantitatives *entre les organismes, tandis que l'approche relationnelle insiste sur les* similarités qualitatives *entre eux.* »[1]

Ainsi, la biologie quantitative disperse tandis que sa propre biotopologie rassemble : là est bien sans doute la raison ultime de cette mutation dans l'épistémologie de Rashevsky. Elle prend en conséquence clairement la forme d'une résistance voire d'une réaction contre la dispersion des modèles singuliers et à usage unique.

Par la suite, Rashevsky explore un autre pan de la topologie mathématique car l'approche par la théorie des graphes lui semble limitée dans la mesure où elle confirme les observations de similarités organiques bien connues mais où elle ne donne pas de résultats théoriques nouveaux ou susceptibles d'inciter à de nouvelles observations. Le souci du test empirique demeure tout de même, bien que lointainement, chez lui. L'approche biotopologique graphique en effet n'est finalement qu'un mode de présentation formelle de résultats théoriques qualitatifs déjà bien connus[2].

Fonction mathématique et fonction biologique : la « biotopologie » ensembliste

En 1958, Rashevsky propose en effet une deuxième approche topologique en biologie théorique : l'approche par les ensembles et non par les graphes. Il est intéressant de remarquer que, dans ce nouveau cadre théorique, l'expression « propriété biologique » est définitivement préférée à celle de « fonction biologique » dans la mesure où le recours au terme de « fonction » prête à confusion avec l'usage mathématique qui en est fait. Rashevsky se montre ici sensible aux mises en garde de Woodger sur les confusions du langage biologique[3]. Selon lui, et en l'espèce, il faut prendre en considération le fait que la fonction mathématique ($y = f(x)$) possède une signification entièrement différente de la fonction biologique. La fonction biologique possède une intensité, par exemple, ce qui n'a aucun sens pour la fonction mathématique. Il faudrait donc éviter des ambiguïtés de langage du type suivant, par exemple : « L'intensité d'une fonction biologique est une fonction de l'intensité d'une autre fonction biologique. »[4] La deuxième occurrence du mot « fonction » renvoie ici à sa signification mathématique alors que les deux autres renvoient à sa signification biologique. Or, comme dans le formalisme topologique qu'il veut introduire, Rashevsky aura recours aux deux, il lui faut les distinguer d'un point de vue terminologique dès le début. Le terme de propriété, noté P et indicé par le type général de propriété (Ps pour la propriété de

[1] "It must be strongly emphasized that the relational approach to biology outlined above in no way supplants the earlier quantitative or *metric* approach. The two are equally important in biology. Neglecting either one of them would be a great error. It must, however, be said that in some respects the relational approach is more basic. It does emphasize the unity of the organism as well as of the organic world as a whole, a fact which the quantitative approach, thus far at least, almost ignores. The metric approach is more likely to emphasize the *quantitative differences* between organisms, whereas the relational approach emphasizes the *qualitative similarities* between them", [Rashevsky, N., 1964], p. 57. C'est l'auteur qui souligne.

[2] [Rashevsky, N., 1958b], p. 267.

[3] C'est d'ailleurs dans cet article qu'il cite Woodger explicitement et pour la première fois dans ce contexte : voir [Rashevsky, N., 1958a], pp. 90 et 93. Il est probable, selon nous, que ce soit Robert Rosen, dont nous parlerons bientôt, qui ait de nouveau attiré l'attention de Rashevsky sur les travaux de Woodger. Cela se confirme si l'on remarque que Rosen a relu le premier article de 1958 ([Rashevsky, N., 1958a], p. 92).

[4] "the intensity of a biological function is a function of the intensity of another biological function", [Rashevsky, N., 1958a], pp. 72-73.

sensibilité, Pm pour la propriété de mouvement, Pc pour la propriété de conduire les excitations ou les stimuli extérieurs, etc.[1]) est donc choisi aux dépens du vieux mot de « fonction ».

Dans cette approche topologique ensembliste, l'organisme est donc conçu comme un ensemble de « propriétés » (par exemple : la sensibilité, la locomotion, la digestion, la sécrétion, etc.[2]). Chacune de ses propriétés est elle-même représentée sous la forme d'un ensemble de sous-propriétés qui « sont incluses logiquement dans les propriétés correspondantes »[3]. Ps, par exemple, est un ensemble de sous-propriétés de sensibilité. La sensibilité à l'amertume de la langue humaine peut être notée Ps_1, alors que sa sensibilité à l'acidité peut être notée Ps_2[4]. De façon générale, les Ps_α (où $\alpha = 1, 2\ldots$) sont des sous-ensembles de Ps. Il est alors possible de noter le fait que certaines propriétés « succèdent immédiatement » à certaines autres. Par exemple, Ps → Pc représente le fait que dès qu'il y a une propriété de sensibilité organique, il y a une propriété de conduction (chimique ou électrophysiologique) qui la suit immédiatement dans le fonctionnement organique. De même, Pc → Pm indique que la propriété générale de mouvement (au niveau molaire ou moléculaire) succède toujours immédiatement à une propriété de conduction (chimique ou électrophysiologique)[5]. Ce sont donc ces flèches qui rendent compte du caractère relationnel de l'organisme. On a certes encore affaire à un graphe, mais, là est la nouveauté, ce graphe, reliant des ensembles de propriétés et non directement des propriétés ponctuelles et précises, peut se dégager d'une représentation par un espace fléché à une dimension[6] (ou par un polyèdre dans un espace métrique[7]). Grâce à la relation d'immédiate succession, Rashevsky peut en effet définir une notion topologique de « voisinage »[8] (« *neighborhood* ») valant pour les propriétés ou les ensembles de propriétés. Le « voisinage » d'une propriété biologique P consiste en cette propriété elle-même et en l'ensemble des propriétés ou d'ensembles de propriétés qu'elle précède immédiatement[9]. Ainsi, avec cette définition du voisinage, les ensembles de propriétés biologiques deviennent-ils des « espaces » au sens réellement topologique du terme[10]. Cette notion d'espace topologique des propriétés biologiques permet, d'une part, de ne pas réduire l'organisme, entendu comme ensemble de propriétés dans cet espace, à une formalisation avec des relations binaires et qui se ramènerait elle-même à une représentation métrique. D'autre part, les flèches d'immédiate succession entre propriétés biologiques, n'ont pas, selon Rashevsky de « signification physique »[11]. Donc il est inutile et trompeur de leur conserver un support formel

---

[1] [Rashevsky, N., 1958a], pp. 73-75.
[2] [Rashevsky, N., 1958a], p. 72.
[3] "which are logically included in the corresponding properties", [Rashevsky, N., 1958a], p. 71.
[4] [Rashevsky, N., 1958a], p. 73.
[5] [Rashevsky, N., 1958a], p. 76.
[6] [Rashevsky, N., 1958a], p. 78.
[7] Selon l'interprétation des graphes donnée par les mathématiciens russe et allemand Pavel S. Alexandroff (né en 1896) et Heinz Hopf (né en 1894) dans leur manuel *Topologie.* Vol I., Berlin, J. Springer, 1935, utilisé et cité par [Rashevsky, N., 1958a], pp. 78 et 92.
[8] Voir l'article de vulgarisation de Maurice Fréchet (1878-1973) *in* [Le Lionnais, F., 1962], p. 124. Un espace topologique y est présenté comme un espace où les propriétés des figures ne sont pas modifiées par déformations continues. La notion de voisinage, plus faible et plus générale que celle de métrique ou même que celle de distance, permet ainsi l'expression préférentielle de cette propriété générale. Pour une présentation rigoureuse, voir [Ramis, E., Deschamps, C. et Odoux, J., 1976, 1988], Tome 3, pp. 26-29. Un espace topologique, en ce sens généralisé depuis les travaux de Emmy Noether (1882-1935) aux alentours de 1925 (par contraste avec les espaces topologiques antérieurs de Felix Hausdorff (1868-1942) pour lequel la topologie se contentait de généraliser une approche géométrique de l'analyse fonctionnelle [Taton, R., 1964, 19995], p. 22), peut ne pas être métrisable ni même distanciable. C'est à partir de ce moment-là que, selon Georges Darmois (1888-1960) et Daniel Dugué (1912-1987) (qui succéda à Darmois à la tête de l'ISUP en 1958), on assista à une « algébrisation de la topologie » (*ibid.*, p. 22).
[9] [Rashevsky, N., 1958a], p. 77.
[10] [Rashevsky, N., 1958a], p. 77.
[11] "*physical* meaning", [Rashevsky, N., 1958a], p. 77 et p. 78. C'est l'auteur qui souligne.

homogène à un espace métrique. Il est donc « plus logique »[1] et plus productif pour Rashevsky de construire un véritable espace topologique à partir de ce graphe des successions. C'est là que l'approche relationnel rompt définitivement avec l'approche métrique en devenant purement qualitative et axée sur le fonctionnel.

« Organisme primordial » et « propositions existentielles »

À partir de là, Rashevsky constate qu'avec ce nouveau formalisme, on peut bien sûr toujours représenter le principe de l'épimorphisme biologique tel qu'il était déjà exprimé dans le formalisme antérieur (1954) des graphes et des applications (« *mappings* ») entre graphes. Mais il évoque un objectif qu'il serait désormais souhaitable d'atteindre à terme pour la biotopologie : la définition de l'organisme minimal ou « primordial »[2] dans lequel toutes les relations entre les grands ensembles de propriétés seraient connues et seraient à la fois les plus générales et les plus simples. Une telle représentation formelle serait en effet utile, même si un tel organisme n'existe pas en réalité, pour pouvoir définir par contrecoup, et par application du principe de l'épimorphisme biologique, les aspects relationnels essentiels de tous les organismes existants ou susceptibles d'exister[3]. Mais cet objectif est encore loin, selon Rashevsky, car on ne dispose pas de toutes les connaissances biologiques qui permettraient de structurer complètement cet espace topologique au moyen de la notion de voisinage ; c'est-à-dire qu'on ne dispose pas d'une connaissance biologique suffisamment étendue et précise en ce qui concerne les relations d'immédiates successions entre propriétés organiques.

Dans le premier article de 1958, Rashevsky en est donc réduit à tirer parti de quelques structurations déjà mieux connues de cet espace topologique. Mais ces bribes de connaissances, une fois formalisées, lui permettent d'aboutir à un résultat qu'il juge déjà tout à fait remarquable. L'approche par la topologie ensembliste permet de produire ce qu'il appelle non pas des prédictions, mais des « propositions existentielles »[4] en biologie. Pour cela, Rashevsky construit d'abord l'application épimorphique d'un organisme pluricellulaire quelconque sur l'« organisme primordial ». Cette application mathématique met en relation les voisinages de l'espace topologique de l'un sur ceux de l'espace topologique de l'autre[5] :

« Soit Ps_v l'ensemble des sensibilités visuelles de toute nature. On a :

$$Ps_v \subset Ps$$

Dans un organisme primordial, on a $Ps \rightarrow Pc \rightarrow Pm$. De là, il suit de (A) [principe de l'épimorphisme entre l'organisme primordial et les autres organismes[6]] que dans certains *organismes supérieurs on doit avoir :*

$$Ps_v \rightarrow Pc \rightarrow Pm(d)$$

[où l'indice (d) indique un des rôles que joue le mouvement et qui est ici en l'occurrence d'aider l'organisme à l'ingestion de nourriture depuis le stade de l'amibe[7].]

[1] "much more logical", [Rashevsky, N., 1958a], p. 77.
[2] "primordial organism", [Rashevsky, N., 1958a], p. 72.
[3] [Rashevsky, N., 1958a], p. 72.
[4] "positive existential statements", [Rashevsky, N., 1968], p. 246.
[5] [Rashevsky, N., 1958a], p. 78.
[6] [Rashevsky, N., 1958a], p. 78.
[7] [Rashevsky, N., 1958a], p. 82.

Dit en mots : il existe des organismes supérieurs dans lesquels les mouvements gastro-intestinaux sont affectés par les stimuli visuels. Un exemple bien connu est le vomissement à la vue de quelques choses déplaisantes. Par le même argument, on a plus généralement :

$$Ps_{\alpha} \rightarrow Pc \rightarrow Pm(d)$$

qui atteste que chez certaines animaux, différents stimuli sensoriels affectent la motilité gastro-intestinale. »[1]

Rashevsky est tout de suite très satisfait de ce résultat dans la mesure où il permet d'affirmer *a priori* la possibilité de l'existence d'un fait biologique qualitatif, c'est-à-dire d'un fait à haute signification biologique au contraire d'un fait quantitatif, mais aussi dans la mesure où il donne, le cas échéant, la *raison* de cette existence.

Ce résultat de la biotopologie ensembliste n'est pas la preuve d'une *nécessité d'existence* d'un fait biologique mais seulement celle de la *plausibilité de son occurrence*. Ce qui n'est pas rien, car, ce faisant, c'est bien la *raison d'être*, le pourquoi[2], et non le comment, qui en est donné. Selon Rashevsky, c'est ce type de résultat qualitatif et relationnel qui n'est pas accessible au moyen d'une « théorie biophysique métrique »[3]. Rashevsky tient également à indiquer que ce résultat ne peut pas non plus être déduit de la théorie de la sélection naturelle car, selon lui, on ne voit pas où pourrait se trouver la valeur adaptative de ce type de dysfonctionnement gastro-intestinal assez handicapant pour l'activité humaine tout au moins[4]. Ce qu'il est important de noter pour l'auteur de ce travail, c'est qu'au contraire de la formalisation topologique ensembliste, la modélisation physico-chimique, parce qu'elle mène à des équations analytiques, peut tout au plus « construire un modèle du mécanisme neuronal » qui, à partir de stimuli sensoriels ou psychologiques, produit le dysfonctionnement gastro-intestinal et ainsi « explique » le comment mais pas le pourquoi d'une relation particulière entre propriétés organiques. Car cette modélisation considère le phénomène de relation qu'elle représente comme *donné et reconnu*. Ce qu'il est déjà en effet d'un point de vue clinique. Elle n'est donc pas capable d'en montrer *a priori* la possibilité, la plausibilité. Ce que veut dire Rashevsky, c'est que si ce fait avait été inconnu, la méthode biotopologique, au contraire de la méthode de modélisation physico-chimique, en aurait pour sa part dévoilé la possible existence et une rapide investigation l'aurait confirmée : il y aurait donc eu, dans un premier temps, la prédiction de l'existence probable d'un fait biologiquement signifiant, sa conception *a priori*, et dans un second temps, la confirmation empirique de cette prédiction.

C'est donc avec ce pouvoir de prédiction existentielle, déjà suffisamment confirmé par le cas de rétrodiction précédemment exposé, que, selon Rashevsky[5], la biotopologie gagne enfin son titre de biologie théorique à part entière aux côtés mêmes de la physique théorique. C'est par là aussi qu'il se sent légitimé dans son refus de se plier à la méthode des modèles déracinés,

---

[1] "Let Ps_v denote the set of visual sensitivities of all kind. We have $Ps_v \subset Ps$. In a primordial we have $Ps \rightarrow Pc \rightarrow Pm$. Hence it follows from (A) that in *some* higher organisms we must have : $Ps_v \rightarrow Pc \rightarrow Pm(d)$. In words : There exists higher organisms, in which gastrointestinal movements are affected by visual stimuli. A well-known example is the vomiting at the sight of some unpleasant things. By the same argument, we have more generally $Ps_{\alpha} \rightarrow Pc \rightarrow Pm(d)$ which states that in some animals different sensory stimuli affect the gastrointestinal motility", [Rashevsky, N., 1958a], p. 83. C'est l'auteur qui souligne.

[2] [Rashevsky, N., 1964], p. 51.

[3] "metric biophysical theory", [Rashevsky, N., 1958a], p. 83.

[4] [Rashevsky, N., 1958a], p. 83.

[5] En 1960, Rashevsky ajoute même que la biotopologie aurait pu prédire l'existence des antibiotiques. En effet, en recourant entièrement théoriquement à des épimorphismes réducteurs à partir d'organismes supérieurs connus comme l'araignée (avec la sécrétion de sa toile) et en s'autorisant ainsi la conception *a priori* de micro-organismes hypothétiques sécrétant de façon similaire des substances nocives pour d'autres micro-organismes, le principe des antibiotiques aurait pu être imaginé comme plausible trente ans avant qu'il ne soit effectivement découvert. Sa découverte en aurait été plus précoce. Voir [Rashevsky, N., 1960b], p. 147.

informationnels ou simplement cybernétiques et isomorphes. Pour Rashevsky, la biotopologie s'occupe bien de la « raison d'être » (« *reason for its existence* »[1]) de certains faits biologiques, même si sa construction est encore loin d'atteindre systématiquement l'ensemble des problématiques biologiques. C'est en ce sens qu'elle produit des « énoncés existentiels ».

« Tranches » et « propriétés » du vivant : Woodger et le second Rashevsky.

À lire les travaux de biotopologie du second Rashevsky, on est frappé de constater une grande similitude de style avec les travaux antérieurs de Woodger. À partir de 1954, Rashevsky ne procède plus en effet par introduction de systèmes équivalents ou de modèles (dont il admet désormais l'existence), qu'il soit de nature physique, électrique ou chimique, mais il agit d'une manière beaucoup plus axiomatique. On voit ainsi s'enchaîner distinctions terminologiques, définitions formelles, règles de calcul logique, propositions et démonstrations. Autour de 1960, cette proximité a fini par apparaître à Rashevsky lui-même puisqu'il va rendre hommage au travail antérieur de Woodger mais en insistant tout de même plutôt sur l'existence de différences entre leurs deux approches. Ainsi, pour nous expliquer cette différence (sur laquelle il ne s'attarde cependant pas), Rashevsky expose une analogie qui existe entre la situation actuelle de la biologie théorique et celle de la physique quantique. Il se pourrait, selon lui, que l'approche de Woodger et la sienne soient deux moyens mathématiques équivalents pour traiter le même problème « de même qu'il existe une approche matricielle et une approche de mécanique ondulatoire dans la théorie quantique ». Elles sont certes « différentes mais équivalentes »[2]. Dans cet extrait d'une préface très courte, Rashevsky ne précise malheureusement pas laquelle des deux approches de biologie mathématique est à considérer selon lui comme apparentée à la méthode matricielle de la physique. Et nous ne disposons pas, par ailleurs, d'autres indices qui pourraient nous aider à répondre à cette question. Mais, selon nous, il est fort probable que cela soit l'approche de Woodger qui s'apparente à la méthode matricielle alors que Rashevsky préfère peut-être en revanche apparenter la sienne à l'approche ondulatoire. Ainsi l'analogie de Rashevsky serait la suivante : la biotopologie est à la méthode axiomatique de la biologie ce que la mécanique ondulatoire est à la méthode matricielle en physique quantique. Dans les deux cas, la biologie formalisée prend son modèle dans la physique théorique.

Par la suite, dans cette courte préface, Rashevsky se pose la question de sa propre évolution épistémologique mais aussi celle du rôle que Woodger aurait pu y jouer :

« Bien entendu, je ne sais pas si, dans mon propre travail, la transition graduelle d'une approche géométrique à une approche via *la théorie des relations a été le résultat d'un développement logique inhérent, comme il m'apparaît, ou si j'ai été inconsciemment influencé par le travail de Woodger. Si tel est le cas, je lui dois certainement de la gratitude. Ses écrits m'étaient familiers dès le temps de leur première publication, mais pendant longtemps j'avais sous-estimé leur valeur ; une erreur de ma part, que je m'empresse de reconnaître et de corriger. C'est à Woodger qu'il revient d'avoir, le premier, introduit en biologie des mathématiques systématiquement relationnelles. »*[3]

---

[1] [Rashevsky, N., 1960b], p. 147.

[2] "just as the matrix and the wave-mechanical approach in quantum theory are different but equivalent", [Rashevsky, N., 1960a], Tome 2, Tome 2, p. viii.

[3] "I do not know of course whether in my own work the gradual transition from a geometrical approach to an approach *via* the theory of relations was the result of an inherent logical development, as it seems to be, or whether I have been subconsciously influenced by Woodger's work. If so, I certainly owe Woodger a debt of gratitude. I gave been familiar

Comme on peut le constater, Rashevsky est donc prêt à reconnaître la priorité des travaux de Woodger, mais il ne nous dit finalement que très peu de choses sur les différences qui persistent et qui lui paraissent malgré tout importantes. Car il y a bien une identité de style qui commence à se faire jour entre l'approche logiciste et l'approche biotopologique. Mais, comme nous avons désormais les moyens de le comprendre, il serait tout à fait erroné de tirer de cette simple identité de style l'affirmation d'une parenté très étroite entre deux perspectives épistémologiques et ontologiques comme entre deux problématiques scientifiques et techniques. L'identité de style, l'identité des formalismes ne dit encore à peu près rien de ce qui rapproche et distingue la biologie de Woodger de celle de Rashevsky. Nous en voulons pour preuve le fait que le symbolisme axiomatique, chez Woodger, l'incite immédiatement, et sans qu'il justifie le moins du monde cet angle d'attaque tant cela lui semble évident, à représenter des « tranches » concrètes (« *slices* »), c'est-à-dire des coupes spatiales et temporelles, composant les organismes afin d'en représenter formellement la combinatoire et le fonctionnement. Woodger ne questionne donc pas du tout le présupposé de l'homogénéité et de la neutralité de l'espace, du temps et de leur continuum tels qu'ils nous apparaissent trivialement et tels qu'ils valent en effet immédiatement pour nous, à échelle humaine, si ce n'est même seulement du point de vue de notre personnalité moderne et occidentale. Son découpage logique se révèle donc être un tranchage spatio-temporel, une atomisation symbolique et linguistique qui insère implicitement une vision prétendument neutre, en tout cas homogénéisante et déjà rationalisée, des dimensions spatiales et temporelles pour la biologie. En cela, il fait violence à la logique autonome du vivant, du point de vue de Rashevsky.

Ce que Tarski appelle la sensibilité rashevskyenne à « l'aspect biologique des problèmes »[1] réside dans le fait que Rashevsky part de la fonction biologique alors que Woodger veut y arriver au moyen de son découpage logique d'apparence neutraliste. Lorsque Rashevsky parle de l'importance des principes biologiques, c'est bien pour continuer à produire une biologie mathématique qui ne soit pas totalement spéculative et qui ne soit donc pas dispensée de la sanction expérimentale. Ce contrôle de la théorie par les données de l'expérience est en effet omniprésent dans le travail de Rashevsky, aussi bien après 1954 qu'avant. Même si, comme Woodger, le second Rashevsky est particulièrement à l'écoute des nouvelles mathématiques et des nouveaux formalismes (axiomatisation formaliste, théorie des graphes, théorie des ensembles, topologie, …), son approche est donc, à ce titre, bien moins formelle que celle de Woodger. Toutefois, il serait aussi erroné de croire qu'il n'y a pas de choix ontologique dans l'usage rashevskyen de la formalisation topologique. Il n'est pas du tout indifférent, et même, il est très significatif qu'alors que l'un et l'autre s'appuient en effet sur la nouvelle approche axiomatique en plein essor dans les mathématiques, le premier, Woodger, s'inspire pour sa part des développements de la logique mathématique qui s'ensuivent, alors que Rashevsky, de son côté, fonde son approche sur l'axiomatique de la topologie algébrique. C'est qu'ils n'interprètent pas le qualitatif et le relationnel de la même manière. Pour Woodger, le relationnel dans la nature vivante émane finalement du regard épistémique que l'on porte sur elle. C'est, en quelque sorte, un relationnisme gnoséologique. Alors que pour Rashevsky, le relationnel émane de la nature vivante elle-même et c'est à nous qui la représentons de disposer d'un formalisme qui capte un tant soit

---

with his writings ever since the time of their first publication, but for a long time I have underestimate their value ; an error on my part, which I hasten to acknowledge and to correct. To Woodger goes the credit for having first introduced systematically relational mathematics into biology", [Rashevsky, N., 1960a], Tome 2, Tome 2, pp. viii-ix.

[1] [Rashevsky, N., 1964], p. 57.

peu cette essence *a priori* relationnelle de l'organique. C'est donc un relationnisme ontologique. Même si logique et mathématiques se sont rapprochées, voire étroitement mêlées, au tournant du siècle, invoquer l'une n'est pas invoquer l'autre, dans les sciences de la nature. En ce sens, la topologie devient, avec Rashevsky, et en complète opposition avec l'approche logiciste, le lieu mathématique à partir duquel et travers lequel la pensée de l'essence des choses naturelles, celle de l'organicisme en biologie, va continuer à être possible. Car, comme nous l'avons évoqué, Rashevsky n'a cessé de considérer la représentation d'une unité ontologique sous-jacente au monde organique comme une nécessaire idée directrice pour la biologie mathématique. Dans ses derniers travaux, en tâchant de décloisonner biologie et sciences humaines, il développera d'ailleurs tous les aspects des expansions que permet l'approche topologique aux domaines de la psychologie, des relations humaines, de la sociologie et de l'histoire[1]. Il produira notamment une théorie sociologique de l'organisme multicellulaire et de la cellule à partir de cette approche biotopologique[2]. Alors que Woodger, dans la perspective du positivisme logique, est porté par l'idée d'une *unification épistémologique*, Rashevsky est donc attiré vers celle d'une *unité ontologique*.

Davantage, il n'est pas jusqu'à un passage de la dernière version (1960) de son ouvrage de biophysique mathématique qui n'aille exposer encore l'espoir que le principe biotopologique de l'épimorphisme lui-même soit à terme « incorporé dans le schème des lois physiques qui gouvernent le monde organique »[3]. C'était, souvenons-nous en, devant l'audace des nouvelles lois théoriques de la physique elle-même que Rashevsky s'était autorisé à émanciper de la seule physique ses premières représentations mathématisées de l'organisme. C'est suivant ce modèle mathématiste qu'il opta pour la « biologie relationnelle » et pour la recherche de principes biologiques autonomes, c'est-à-dire n'ayant pas à être décelés à partir du cœur même de la physique et de ses objets d'étude propres. Pour lui, en 1960, il n'en demeure pas moins nécessaire d'espérer que ces principes biologiques autonomes parviennent tout de même un jour à être « réduits » aux principes physiques, car si la physique pouvait déjà expliquer la stabilité physique de certains micro-organismes, ce serait peut-être en empruntant ensuite le trajet formel du principe (organique) de l'épimorphisme qu'elle pourrait étendre sa législation au monde organique supérieur. Ce passage témoigne du fait que Rashevsky n'a malgré tout jamais totalement abandonné sa perspective réductionniste et unitaire, en biologie mathématique. Si nous ne craignions l'oxymore, nous oserions même dire que Rashevsky, jusqu'à la fin de sa vie, est comme le garant d'une nouvelle sorte de réductionnisme : un réductionnisme élargi. Les modèles d'ordinateur sont par lui ramenés à des formalismes particuliers, pas à des pratiques fondamentalement différentes. Cette assimilation de l'ordinateur peut alors valoir comme une sorte de liquidation.

---

[1] Voir [Rashevsky, N., 1966a], [Rashevsky, N., 1966b] et [Rashevsky, N., 1966c]

[2] [Rashevsky, N., 1966c], p. 655.

[3] "Can the principle of bio-topological mapping be incorporated into the scheme of physical laws which govern the organic world ? The way to do this would seem to be as follows : The physicist must derive the possibility of a living molecule or simple small aggregate of molecules, proving its stability as a dynamic system and hence its ability of continued existence. Then it would be necessary to prove a general theorem to the effect that any physical system, derived from such a 'primordial' by a transformation rule (A) [= transformation continue d'un organisme quelconque sur le primordial] o another related rule, has the same stability properties. This would reduce the principle of bio-topological mapping to already established physical principle", [Rashevsky, N., 1960, a], pp. 343-344.

Une conséquence : l'oubli de la forme

La différence et la symétrie que l'on découvre entre les options philosophiques de Woodger et Rashevsky ont néanmoins toutes deux des limites : celles mêmes de la fécondité pratique, comme celle de la sanction de l'expérience. À cet égard, dans les années 1950, l'approche théorique de Rashevsky garde une certaine avance et un certain crédit aux yeux des biologistes que n'a pas l'approche de Woodger. On pourrait ainsi se représenter la biotopologie comme une proposition théorique majeure pour l'entreprise de représentation mathématique des phénomènes biologiques, si cette dernière ne présentait pas toutefois un défaut, lui aussi majeur, et qu'a reconnu en 1958 un des élèves de Rashevsky lui-même, Robert Rosen. Car, si l'on consulte de près la réédition de 1960 du grand ouvrage de Rashevsky, en ce qui concerne la représentation mathématique de la forme des plantes et des animaux, les chapitres de 1944-1948 sont reproduits quasiment à l'identique. Ce qui signifie que la biotopologie de 1954 et 1958, en se concentrant sur l'organisation mutuelle des *fonctions* organiques a totalement négligé l'intégration de la problématique morphologique et morphogénétique. Elle a oublié ou escamoté la problématique de la forme et de la structure. En fait, cette négligence a été délibérée, puisque Rashevsky tout en reconnaissant en d'Arcy Thompson un précurseur notable de son approche topologique, accuse cependant le traité du célèbre naturaliste de ne se concentrer que sur des « relations superficielles » et donc de manquer ce qui fait réellement le caractère « relationnel » de l'organique[1]. L'approche de Woodger, en revanche, ne peut être critiquée de ce point de vue, puisque nous avons vu comment elle tente de représenter l'accroissement en complexité structurelle concrète des organismes en état de genèse au moyen de relations logiques d'un à plusieurs (« *one-to-many* »). L'application épimorphique, chez Rashevsky, même si elle est formellement équivalente à celle de Woodger, reste cependant toujours *abstractive* du point de vue des éléments constitutifs du corps organique : seules des *fonctions organiques* sont en relation d'une à plusieurs. De plus, les « tranches » du vivant réfèrent bien à l'ontogenèse, alors que Rashevsky n'insiste pas sur la possibilité qu'aurait un organisme d'être épimorphique à lui-même au cours de son développement ni sur les leçons que pourrait en tirer l'embryologie. C'est même, comme nous l'avons vu, ce côté abstractif que recherche délibérément Rashevsky au moyen d'espaces topologiques non métriques. La biotopologie de Rashevsky ne peut résister à la méthode des modèles, aux modèles d'ordinateur et à leur pouvoir dispersif, qu'en escamotant la problématique de la mise en forme concrète. La question de la genèse de la forme proprement dite, au sens de la configuration spatiale, y reste donc en suspens. C'est précisément à cet oubli de la forme qu'un de ses élèves les plus brillants, du point de vue mathématique en tous les cas, va essayer de remédier. Par la même occasion, cet élève va poursuivre la croisade de la biotopologie contre la dispersion des modèles. Mais il le fera avec des armes renouvelées et fraîchement empruntées à la généreuse source des mathématiques.

[1] "Implicitly topological relations are contained in even older considerations of d'Arcy Thompson […] These are, however, relatively superficial relations. Topological analogies go much deeper in the realm of the living when we observe not merely structural but functional (in a biological sense) relations", [Rashevsky, N., 1960a], Tome 2, p. 309.

CHAPITRE 13 – La « biologie relationnelle » de Robert Rosen (1958)

En 1958, Robert Rosen (1934-1998) est un jeune chercheur en biologie mathématique qui travaille sous la direction de Nicolas Rashevsky au *Committee on Mathematical Biology* de l'université de Chicago[1]. Après la récente conversion de Rashevsky à la formalisation topologique abstractive des fonctions biologiques, Rosen vient apporter un regard neuf sur les travaux les plus récents de son maître. En reprenant également quelques unes des idées énoncées en 1954 par David Cohn[2], il considère que la biologie mathématique doit s'inspirer de l'ingénierie récente et, en particulier, de la théorie des automates. Mais alors que pour Cohn, le biologiste théoricien devait surtout prendre modèle sur la *pratique* de conception de l'ingénieur en décomposant ses modèles physiques en sous-modèles optimisables (selon le principe de « conception optimale » supposé valoir pour tout être organique), Rosen conçoit plutôt l'idée selon laquelle l'incontestable analogie entre les artefacts et les systèmes biologiques, confirmée en outre par la perspective cybernétique contemporaine, peut aussi mener le théoricien de la biologie à un nouveau type de *théorisation* et pas nécessairement ou seulement à une nouvelle *pratique* de modélisation physico-chimique. En ce sens, Rosen interprète la leçon de Cohn encore autrement que ne le fit Rashevsky. Mais, ce faisant, il peut tout de même rejoindre la décision rashevskyenne de fonder une véritable « biologie relationnelle » et il préserve ainsi le côté purement théorique de la biologie mathématique.

Or, en 1958, c'est bien la « théorie des systèmes », telle qu'elle est récemment reconnue de façon institutionnelle aux Etats-Unis[3], qui semble pouvoir jouer ce rôle selon lui. Mais Rosen ne retient de cette théorie inchoative que la définition du mot « système » : « tout type de structure qui agit, à travers une certaine séquence d'opérations, pour produire un ensemble défini de matériaux de sortie à partir d'un ensemble donné de matériaux d'entrée, ou à partir d'un ensemble donné de conditions environnementales »[4]. Moyennant cette définition, Rosen se propose de prendre en compte et de traduire en un langage formel nouveau ce que Rashevsky avait mis en évidence lorsqu'il avait montré qu'une même fonction organique peut être assurée de différentes manières, plus ou moins complexes (principe de l'épimorphisme biologique) d'un point de vue physico-chimique. C'est ce fait biologique là qui avait justifié l'insistance de Rashevsky en 1954 sur le nécessaire caractère relationnel de toute biologie théorique future.

L'expression même de « biologie relationnelle » est primitivement due à Rashevsky. Et Rosen la reprend telle qu'elle mais en l'interprétant en des termes systémiques et en l'acclimatant

---

[1] Nous n'avons pas beaucoup de documents biographiques sur Robert Rosen. En juillet 2003, le site Internet de sa famille (maintenu par sa fille Judith Rosen) annonce cependant de prochaines publications en ligne à ce sujet. Nous savons déjà qu'entre 1957 et 1958, Rosen travaille dans le même laboratoire et quasiment au même projet que Rashevsky puisque les publications des deux chercheurs font référence au même numéro de dotation budgétaire, le « *Grant RG-5181* » du *United States Public Health Service*. Voir [Rosen, R., 1958a], p. 259 et [Rashevsky, N., 1958b], p. 273. Récemment (juillet 2004), dans son forum de discussion, Judith Rosen minimise l'influence de Rashevsky sur les formalisations de son père en affirmant que Robert Rosen avait déjà formé l'essentiel de ses idées quand il est venu frappé à la porte de Rashevsky. Ce dernier l'aurait simplement aidé à poursuivre avec courage dans cette voie de la biologie théorique désormais si méprisée par le milieu académique. Nous prenons cette information avec circonspection. Mais il est certainement vrai que Rosen a dû se former seul à de nouvelles mathématiques auxquelles Rashevsky ne s'intéressait pas particulièrement.

[2] Voir *supra*.

[3] Rosen cite ainsi la définition du terme « système » telle qu'on la trouve dans le volume I des annales de la *Society for Advancement of General System Theory*, de 1956. Bertalanffy raconte la création en 1954 de cette société *in* [Bertalanffy (von), L., 1968, 1973], pp. 13-14.

[4] "any type of structure which acts, through a certain sequence of operations, to produce a definite set of output materials from a given set of input materials, or from a given set of environmental conditions", [Rosen, R., 1958a], p. 246.

à la formalisation par des tableaux de flux (« *flow charts* ») ou, plus précisément, par des « diagrammes de blocs » (« *block diagrams* »)[1] entre-temps venus de la technologie, de la théorie des circuits et de la théorie des automates. Ces diagrammes représentent des « boîtes noires » (« *black boxes* ») reliées par un graphe orienté. Chaque bloc du diagramme peut ainsi n'être défini que comme un « système », au sens de la définition précédente, sans que l'on ait besoin de la connaissance de sa structure interne. Selon Rosen, ce diagramme de bloc reflète déjà assez fidèlement et essentiellement ce qui se produit par nature dans tout être organique : le métabolisme. C'est là que l'analogie entre système naturel et système artificiel peut valoir pour lui sans que l'on perde pour autant l'aspect relationnel du système naturel dans sa représentation formelle : les entrées et sorties des « boîtes noires » peuvent être identifiées à des entrées et sorties de substances s'effectuant dans autant de parties de l'organisme réel.

Des « propriétés » aux « composants » du système biologique : le système (M, R)

S'inspirant également de la récente théorie générale des automates de von Neumann (publiée en 1951), Rosen a donc d'abord tendance à considérer les boites noires de son diagramme ou les sommets du graphe comme représentant des *parties concrètes* de l'organisme dont il veut produire une représentation globale. Il les appelle des « objets » (« *objects* »), des « parties » (« *parts* ») ou des « composants » (« *components* »)[2]. Rosen semble ainsi abandonner la voie abstractive et résolument fonctionnelle récemment ouverte par son maître. Et il semble pouvoir de nouveau s'ouvrir à des questions de morphogenèse. Ce n'est pourtant pas si certain : le premier article de 1958 présente des ambiguïtés à cet égard. S'agit-il d'une formalisation du fonctionnel ou du structurel ? Y a-t-il même lieu de les y opposer chez lui ? Nous y reviendrons. Observons avant tout et rapidement en quoi consistent son système général et sa démonstration.

Dès le début, l'objectif de Rosen est de partir du principe que les comportements caractéristiques des systèmes biologiques ne sont pas seulement l'anabolisme et le catabolisme mais aussi l'activité de « réparation » de certaines parties du système. Ce comportement explique en effet l'évolutivité du système biologique en même temps que sa relative durabilité. Il est donc primordial. L'argument que Rosen donne pour justifier cette insistance, nouvelle en biologie mathématique, sur la faculté de réparation ne fait qu'invoquer l'évidence et l'observation la plus triviale et la moins instrumentée[3]. Mais, même si Rosen ne le dit pas, on ne peut nier sur ce point l'influence qu'a pu avoir sur lui la problématique des automates auto-reproducteurs de von Neumann. Et effectivement, Rosen connaît parfaitement bien ces travaux[4]. Mais ce qu'il propose avec le concept de « réparation » (« *repair* ») est davantage commandé par sa propre perspective physiologique et métabolique sur l'organisme. Sa proposition est de surcroît plus modeste ; car imposer que certaines « parties » de l'organisme puissent être « rétablies » (« *re-established* »[5]) lui semble suffire pour finir de caractériser globalement et formellement (en plus de l'anabolisme et du catabolisme) tout être vivant. Ce qu'il veut montrer, c'est qu'il existe une procédure générale de construction de systèmes. Ces systèmes sont conçus sous la forme de graphes orientés reliant des composants élémentaires et susceptibles de représenter des organismes entiers dans leur fonctionnement.

[1] [Rosen, R., 1958a], p. 246.
[2] [Rosen, R., 1958a], p. 246.
[3] [Rosen, R., 1958a], p. 251.
[4] [Rosen, R., 1958b], p. 341.
[5] [Rosen, R., 1958a], p. 255.

L'exemple qu'il choisit particulièrement est celui de la cellule individuelle. Il doit exister en elle un ensemble nommé **R** de parties, ou de composants, susceptibles de réparer l'organisme cellulaire, c'est-à-dire capables de reconstituer certains autres composants inhibés ou détruits de la partie métabolique **M** du système. Aux côtés de chaque composant Mi du graphe formel global **M**, Rosen ajoute donc un autre composant élémentaire Ri dont les entrées ne peuvent être que des sorties de **M** (car ne devant pas servir au fonctionnement métabolique interne du système mais s'ajoutant à lui sur sa marge) et dont la seule activité en sortie est de fournir un matériau qui n'est rien d'autre qu'une réplique de Mi.

Rosen se penche alors sur les contraintes topologiques qui s'imposent à un tel système connecté pour qu'il soit durable, c'est-à-dire pour qu'un sous-système, lui aussi entièrement connecté, puisse tout de même apparaître et fournir des sorties similaires lorsqu'un des composants internes Mi est détruit. Il est ainsi amené à démontrer un certain nombre de théorèmes qui ont, selon lui, une grande signification biologique. Le théorème 1 montre que si un composant est détruit, seules deux issues sont possibles : soit le système entier défaille et est totalement détruit, soit un sous-système continue à fonctionner seul[1]. Le théorème 2 montre qu'il est impossible que tous les composants d'un même système puissent être rétablis[2]. Dans tout système de ce type, il existe donc forcément un composant Mi qui, en défaillant, fait également défaillir d'autres composants Mj qui d'ordinaire, et plus ou moins directement au vu de la topologie du graphe, contribuent au fonctionnement de son composant de réparation associé Ri. Un des résultats fondamentaux des théorèmes est que le système ne peut donc pas toujours se maintenir dans sa topologie initiale. Il passera tôt ou tard la main à un de ses sous-systèmes topologiquement moins complexes que lui, voire sera totalement détruit. Le théorème 3, corollaire du théorème 2, montre même l'existence d'un composant central pour tout système de ce type, c'est-à-dire d'un composant dont la destruction provoque *directement* la défaillance du système entier. Enfin, même si Rosen ne parvient pas à lui donner la forme d'un théorème, il nous donne une idée, selon lui intuitive, de ce que pourrait être un raisonnement qui montrerait la commodité qu'il y a pour une cellule vivante de disposer d'un lieu spatialement donc aussi topologiquement séparé pour isoler les Ri (i = 1, …, n) réparant les Mi (i = 1, …, n) de ces mêmes composants métabolisants. Dans le cas de la cellule isolée, c'est ce que les cytologistes appellent le noyau : on voit intuitivement qu'une telle ségrégation topologique permet en effet une plus grande capacité de rétablissement pour le cytoplasme comme pour la cellule dans son ensemble. Le « fait biologique empirique »[3] selon lequel beaucoup de cellules disposent d'un noyau peut donc se déduire de la combinaison du « principe de conception optimale » de Rashevsky et Cohn et de cette nouvelle représentation formalisée proposée par Rosen. Comme Rashevsky, avec cette approche systémique graphique et relationnelle, Rosen produit donc des énoncés existentiels *a priori*.

Le jugement du maître : un « modèle topologique »

Lorsque Rashevsky lit ce travail, il y sent une grande maîtrise mathématique et il voit tout de suite l'importance que d'autres pourraient lui donner ultérieurement, dans la mesure où Rosen semble se rapprocher du but qu'il a lui-même fixé à la biologie mathématique : mettre en lumière un fonctionnement biologique général qui soit en même temps réellement indépendant (du moins

[1] [Rosen, R., 1958a], p. 253.
[2] [Rosen, R., 1958a], p. 255.
[3] [Rosen, R., 1958a], p. 259.

dans sa formulation) des principes de la physique[1]. Comme souvent, et fidèle en cela à sa pédagogie exigeante et élitiste, alors même qu'il s'agit de la première publication d'un de ses meilleurs élèves, âgé d'à peine 24 ans, il va néanmoins tâcher d'en relativiser la portée dans un article qu'il publie *in extremis* mais immédiatement après celui de Rosen, dans ce même volume 20 (numéro 3) du *Bulletin of Mathematical Biology*[2]. Dans cette courte note, Rashevsky fait tout d'abord remarquer que, parce que Rosen recommence à parler de « composants » de l'organisme, alors que lui-même avait voulu élever la biologie mathématique à la considération des seules « propriétés » fonctionnelles encadrées par d'hypothétiques principes biologiques généraux (dont celui de la conception optimale et celui de l'épimorphisme), il ne faudrait pas du tout confondre sa propre approche biotopologique avec celle de son élève :

« Dans un article récent, Robert Rosen a appliqué des considérations topologiques à l'étude d'un organisme comme un tout. Ces considérations n'ont pas de relation directe avec le principe de l'application biotopologique. Elles représentent plutôt un modèle topologique *d'un organisme, spécifiquement un modèle des mécanismes de réparation que l'organisme possède à destination de ses parties perdues ou détériorées. »*[3]

Ce passage est très intéressant car il indique précisément le lieu où Rashevsky situe la frontière entre un modèle et une théorie en biologie mathématique. Alors même que, depuis 1954, il recourt lui-même à diverses formulations de la topologie pour produire des représentations mathématiques théoriques des êtres vivants qui *ne soient plus* en même temps fondées sur des modèles physico-chimiques de processus particuliers, il perçoit la possibilité que le recours à la topologie, à cette nouvelle mathématique, n'est pas suffisant dans la conversion qu'il préconise en biologie. Il lui apparaît manifestement que ce n'est pas le formalisme mathématique qui suffit à faire d'un modélisateur (en l'occurrence Rosen) un véritable théoricien. C'est bien ce qui le chagrine dans le travail déjà très abouti de son élève. Dans son premier article de 1958, avec la construction du système (M,R), c'est-à-dire un graphe orienté de composants organiques métabolisants et se réparant, Rosen utilise bien une représentation topologique formalisée. Mais les sommets de son graphe ne semblent pas être des représentations de « fonctions » organiques, ou de ce que Rashevsky appelle à la même époque des « propriétés ». Elles semblent bien être au contraire des représentations de simples « parties » de l'organisme. Dans le chapitre 32 (Tome 2) de la troisième édition de son livre, Rashevsky proposera d'ailleurs des exemples concrets que Rosen s'était justement abstenu de donner : ces parties que propose de représenter Rosen dans son graphe peuvent être des organes comme les yeux, l'estomac, le rein[4], etc. Ce que nous pouvons comprendre, c'est que, selon Rashevsky, il semble bien que son élève, avec les travaux sur les automates de Turing, von Neumann et Ulam, subisse un peu trop l'influence d'une nouvelle forme de physicalisme imitatif, avec les modèles de simulation de morphogenèse, au moment même où il voulait lui-même s'en dégager, tout au moins méthodologiquement, et souhaitait en extraire ses élèves[5]. Le fait que la topologie puisse être utilisée pour représenter des formes

[1] [Rashevsky, N., 1968], p. 243.
[2] [Rashevsky, N., 1958c].
[3] "In a recent paper, Robert Rosen applied topological considerations to the study of an organism as a whole. Those considerations have no direct relation to the principle of biological mapping. They rather represent a *topological model* of an organism, especially a model of the repair mechanisms which organisms possess for lost or impaired parts", [Rashevsky, N., 1958c], p. 275. C'est nous qui soulignons.
[4] [Rashevsky, N., 1960a], Tome 2, p. 390.
[5] Plus tard, Rosen soulignera la certaine indifférence voire la réticence qui caractérisa Rashevsky devant le développement des usages de l'ordinateur. Selon Rosen, si Rashevsky avait eu la possibilité de se servir d'un

spatiales, comme la ségrégation des composants de réparations dans le noyau cellulaire, a donc quelque chose de profondément choquant pour Rashevsky :

« Dans la mesure où notre but est de découvrir des principes généraux et fondamentaux en biologie, nous devrions essayer de réduire tous les modèles, topologiques ou autres, aux principes généraux. »[1]

Rashevsky propose donc de marginaliser et d'intégrer la méthode générale de « modélisation » topologique de Rosen dans sa propre biotopologie qu'il juge plus principielle. C'est le concept de réparation (que Rashevsky identifie à celui de reproduction) qui fait finalement le cœur de la proposition de Rosen, selon lui. Il suffit donc de définir un ensemble de propriétés Pt qui rassemblera toutes les transformations dont celles qui partent de molécules sélectionnées par les enzymes pour construire un nouvel organe ou organisme et qu'on appellera « reproduction ». La définition de la propriété Pt a l'avantage de faire disparaître la considération, trop réaliste au sens d'une réalité physico-chimique pour Rashevsky, des « entrées » et des « sorties » dans les systèmes de Rosen[2]. En ne considérant que la propriété Pt, on s'abstrait de toute représentation physico-chimique plus ou moins vague de la fonction organique de transformation, de réparation ou de reproduction, puisqu'elle ne représente plus que les « applications » ou « morphismes » (« *mappings* ») des sorties sur les entrées, c'est-à-dire leurs simples *relations* mutuelles. Rashevsky force donc le formalisme de Rosen à se mouler dans son propre formalisme relationnel et abstrait. C'est ainsi que Rashevsky « s'assimile » en quelque sorte le travail de Rosen.

Rashevsky indique ensuite très cursivement que, si l'on part de son hypothétique « organisme primordial », il sera justement doté de deux seuls composants élémentaires au sens de Rosen : M et R[3]. Pour que les hypothèses de Rosen fonctionnent dans ce cas, il faudra donc bien que la fonction de réparation de R soit aussi et en même temps une opération de reproduction de (M, R) dans son ensemble, car M ne serait pas durablement rétabli si R ne l'était pas en même temps. Par hypothèse, le primordial n'a en effet pour sous-système vivant que lui-même. Dès lors si l'on admet cette entorse à la première formalisation de Rosen (puisqu'il faut tout de même imposer que R se reproduise aussi lui-même, ce qui est d'ailleurs retomber dans la problématique, plus difficile, de von Neumann[4]), il est en effet possible de passer ensuite de la représentation formelle du « primordial » à celles d'organismes plus complexes par l'emploi d'applications continues, au sens de la topologie des espaces à voisinages telle que Rashevsky l'a précédemment introduite[5].

Ce faisant, Rashevsky reconnaît le caractère possiblement primordial de la propriété organique de reproduction : tout comme les autres propriétés, telle la nutrition, on pourrait en suivre la complexification dans le règne du vivant au moyen de sa biotopologie. Elle pourrait même y occuper une position centrale. Et il loue son élève de le lui avoir fait remarquer[6]. Mais Rosen n'a pas pour autant proposé un nouveau principe biologique, pour lui. En cela, selon son maître, il n'a pas considérablement étendu le savoir théorique en biologie.

---

ordinateur, il s'en serait dispensé, au vu de ses options épistémologiques : "he would not have used computers even if they were available", [Rosen, R., 2000], p. 121.

[1] [Rashevsky, N., 1958c], p. 276.

[2] [Rashevsky, N., 1958c], p. 277.

[3] [Rashevsky, N., 1958c], p. 277.

[4] Mais Rashevsky n'évoque pas von Neumann et ne s'attaque pas à ce problème logique.

[5] [Rashevsky, N., 1958c], pp. 279-280.

[6] [Rashevsky, N., 1958c], p. 276.

L'intérêt d'une ambiguïté terminologique

De son côté, Rosen ne réagit pas sur ce terrain parce qu'il voit que la critique de Rashevsky est partiellement injuste. C'est que d'autres préoccupations retiennent son attention par ailleurs. Dès son premier article de 1958, Rosen, sans lever l'ambiguïté qu'introduisent les termes de « parties » ou de « composants », a pourtant bien fait écho à ce que le principe de l'épimorphisme avait fait apparaître aux yeux de Rashevsky dès 1954 : la sous-détermination des mécanismes biologiques particuliers, et donc des modèles physico-chimiques admissibles, pour une « propriété » organique donnée.

Dans son premier article de 1958, Rosen traduit ce fait, qu'il ne conteste pas, mais dans un langage qui lui est propre. Sa propre théorie relationnelle de la biologie prend avant tout pour objet ce qu'il nomme la « structure grossière » (« *coarse structure* ») des systèmes biologiques, à laquelle il oppose la « structure fine » (« *fine structure* »)[1]. À cette occasion, il repositionne l'objectif scientifique de la biologie mathématique en l'opposant explicitement à celui de la « biochimie »[2] qui remporte à la même époque de grands succès[3]. Ce sera d'ailleurs par la suite un thème récurrent de son travail[4] car, au début des années 1950, le jeune biologiste théoricien qu'est Rosen a l'occasion de sentir tout de suite, à la différence de la génération antérieure des biophysiciens théoriciens, qu'il aura d'autant plus de mal à imposer l'approche mathématique qu'une concurrence à la fois nouvelle et rude s'exprime et réalise déjà de grandes choses.

Mais voici en substance l'argument de Rosen contre l'hégémonie de la biologie moléculaire : les biologistes molécularistes font de la recherche là où il y a de la lumière, celle que projettent sur la nature vivante les seuls instruments disponibles, et non nécessairement là où il serait pertinent d'en faire. C'est en ce sens qu'ils se condamnent à la seule étude de la « structure fine » puisque la plupart des techniques observationnelles n'ont affaire qu'à cette échelle du vivant[5]. On le voit, Rosen, en nommant et en indiquant tout un secteur d'étude qui reste vierge (les « structures grossières » de l'organisme) travaille à infléchir la problématique rashevskyenne, pour légitimer, mais sous une forme déjà nettement plus défensive, l'existence ou la survivance de son domaine d'investigation : la biologie mathématique théorique. Il se sent dans l'obligation de déplacer légèrement les termes majeurs de l'épistémologie de son aîné pour pouvoir continuer à bénéficier lui-même d'une place plus que jamais contestée, dans les secteurs de recherche de la biologie. Il doit donc modifier ce qui lui est transmis pour continuer à en récolter certains fruits. C'est une des raisons pour lesquelles il ne peut totalement satisfaire à la demande de son maître ni aux critères de son épistémologie : l'ambiguïté maintenue au moyen de la notion de « composants » organiques a certes l'inconvénient de déplaire à Rashevsky, mais, selon nous, elle a l'avantage, aux yeux de Rosen, de fournir une arme de combat redoutable contre ces nouveaux biophysiciens que sont les biologistes moléculaires mais qui ont oublié la modestie originelle, la mobilité intellectuelle et l'esprit d'investigation tous azimuts qui caractérisaient les premiers biophysiciens. Pour Rashevsky et Rosen, ces derniers, en effet, sans encore user de ce

[1] [Rosen, R., 1958a], p. 246.
[2] [Rosen, R., 1958a], p. 247.
[3] Précisément avec la découverte de la double hélice de l'ADN en 1953.
[4] Voir, sur ce sujet, l'article d'un élève de Rosen, le physiologiste Donald C. Mickulecky, professeur à la faculté de médecine de l'Université du Commonwealth de Virginie (Richmond), [Mickulecky, D. C., 1996], p. 11. Voir également [Rosen, R., 2000], p. 225.
[5] "Most of the observational techniques at our disposal will yield only fine structure ; it is probable that most of the extant biochemical literature, for example, deals with problems of fine structure in this sense", [Rosen, R., 1958a], p. 247.

terme, savaient déjà qu'ils ne procédaient qu'à des modélisations physico-chimiques particulières, essentiellement révocables (ce qui est d'ailleurs une lecture rétroactive contestable de sa part[1]). Mais le réductionnisme unilatéral et figé de ces nouveaux biochimistes est bien ce qui inquiète et ce que refusent en bloc Rashevsky et Rosen.

Finalement, et on peut le comprendre, afin que la continuité de droit entre la structure fine et la structure grossière soit au moins pensable et que la biologie mathématique réaffirme sa présence aux côtés de la biologie moléculaire, voire contre elle, il faut que Rosen renonce quelque peu à l'abstraction que Rashevsky a introduite dans ses formalismes lorsqu'il parle de propriétés organiques et non de composants. À ce titre, on voit bien que Rosen doit se rapprocher, d'une certaine manière, de l'option de Woodger qui consistait à représenter directement par des symboles atomiques les différentes « parties » ou « tranches » de l'organisme. Mais Rosen se garde bien aussi de tomber totalement dans cet usage du formalisme mathématique.

Car, même s'il est préoccupé par l'hégémonie montante de la biochimie, il a manifestement ménagé une porte de sortie honorable pour la biologie relationnelle à la fois fonctionnelle et abstractive de son maître, comme pour le principe de l'épimorphisme qui l'accompagne. Ainsi, aux côtés de celles de « structure fine » et de « structure grossière », invente-t-il la notion clé de « réalisation physique véritable des composants »[2]. Quand la théorie des systèmes va jusqu'à représenter la structure fine d'un composant organique, c'est là qu'elle propose une « réalisation physique » de ce composant. Et Rosen d'introduire dans ce contexte les anciennes analogies : la réalisation physique, ou structure fine, d'un composant est à sa représentation systémique (sous forme d'une boîte noire avec une entrée et une sortie) ce que les états microscopiques de la thermodynamique sont à ses états macroscopiques, ce que l'anatomie est à la physiologie, ou, « dans la terminologie de Rashevsky, ce que l'aspect métrique de la biologie est à son aspect relationnel »[3]. Le lien avec les préoccupations du maître est donc retrouvé.

En conséquence de ses précisions terminologiques, Rosen insiste finalement sur le fait que tout composant peut être « réalisé physiquement » d'une infinité de façons[4]. Et il en tire également l'affirmation essentielle (par laquelle Rashevsky semble justement n'avoir pas été convaincu) qui dit, en substance, que dans la représentation de son « diagramme de blocs », « il n'est pas nécessaire qu'un composant […] soit reconnaissable au moyen d'un point de repère physique dans une réalisation particulière du système »[5]. Il est donc en droit possible de ne pas se focaliser sur le terme de « composant » et d'y voir la représentation d'une propriété organique qui ne soit pas nécessairement manifestée ou effectuée par une « partie » physiquement, c'est-à-dire anatomiquement, définissable de l'organisme[6].

---

[1] Car, comme nous l'avons vu, il n'est pas certain qu'à l'époque (1933-1948) où Rashevsky comparait les mérites de ce qu'il appelait encore des « théories » biophysiques (et non pas des « modèles » alors que le terme existait et était en usage en physique et en biologie des populations), il n'ait pas eu le désir et l'espoir de trouver une *théorie* biophysique unique et optimale.

[2] "actual physical realizations of these components", [Rosen, R., 1958a], p. 246.

[3] "or, in Rashevsky's terminology (Rashevsky, 1954), as do relational and metrical aspects of biology", [Rosen, R., 1958a], p. 247. Nous avons inversé l'ordre de l'analogie dans notre traduction afin de l'adapter à notre formulation.

[4] Ce sont donc les réalisations matérielles qui sont diverses et éparses. La formalisation, quant à elle, doit être uniforme et rassemblante. C'est là exprimer tout le contraire de ce que suppose l'épistémologie positiviste, perspectiviste et dispersante des modèles : pour elle, les modèles sont divers et épars, seule la réalisation est unique ; mais elle est inaccessible car irreprésentable.

[5] "It is not necessary that a component in a block diagram be recognizable by means of a physical landmark in a particular realization of the system", [Rosen, R., 1958a], p. 247.

[6] Dans les années 1970, notamment après sa lecture décisive de René Thom en 1972, Rosen reprendra cet argument. Et c'est avec son appui qu'il s'autorisera pendant le reste de sa carrière à réintroduire quelque chose comme une cause finale, non matériellement situable, dans les modèles formels (ou « grossiers ») de l'organisme. Voir [Rosen, R., 2000], pp. 156-163.

Application de la « théorie des catégories » à une « théorie de la représentation » des systèmes biologiques

Dans son second article de 1958, publié après la note intéressée mais dubitative de Rashevsky[1], Rosen va lever les derniers doutes de son maître en empruntant résolument le chemin d'abstraction qu'il préconisait mais en recourant pour cela à des outils mathématiques très récents et assez sophistiqués. Ce travail de récupération quasi-immédiate d'une suggestion mathématique très récente témoigne selon nous d'un sentiment réactif et défensif croissant dans la biologie théorique de l'époque. Il s'agit de quelque chose comme un dernier défi abstractif, une sortie par la haut. Son abstraction recherchée est d'autant plus intimidante qu'elle doit servir à masquer et à exprimer tout à la fois une agressivité certaine à l'encontre des approches molécularistes triomphantes. Il nous faut tâcher d'en comprendre ici les grandes lignes de manière à voir où peut se loger une certaine résistance, de forme supérieure, à la modélisation comme à l'émergence de la simulation par ordinateur.

Lors de ce dernier trimestre de 1958, Rosen s'intéresse en effet de près à une théorie purement mathématique qui avait été publiée en 1945 par deux mathématiciens américains, Samuel Eilenberg et S. Mac Lane, dans les *Transactions of the American Mathematical Society*. Elle lui semble pouvoir résoudre une série de difficultés qui se présentent lorsqu'on en reste à la représentation formelle des organismes par diagrammes de blocs. D'une part, en effet, la formalisation par de tels diagrammes impose une représentation analogue à celle que suggère la théorie des graphes, avec les contraintes qui vont de pair. Tout d'abord, la théorie des graphes ne permet pas de prendre en compte le fait qu'une même sortie d'un composant donné puisse être une entrée pour plusieurs autres composants. Autrement dit, dans la réalité biologique, le nombre de sorties *distinctes* produites par un composant est inférieur ou égal au nombre de flèches qui en sortent[2]. Ainsi, par exemple, une glande endocrine peut-elle sécréter une hormone, l'*unique* sortie, qui va pourtant affecter *plusieurs* organes : d'où plusieurs flèches qui devraient sortir de la représentation formelle de cette glande. Symétriquement, un même composant peut envoyer plusieurs différentes sorties à un autre composant. Ce qui ne sera représenté, dans le graphe, que par une seule flèche reliant les deux. Ainsi, la glande endocrine que l'on appelle la glande pituitaire, ou hypophyse, envoie-t-elle différentes hormones au même organe. Rosen rappelle qu'un être vivant est un être relationnel certes, mais dont les relations sont de surcroît très rarement « binaires », c'est-à-dire platement bilatérales (un émetteur → un récepteur). Elles sont le plus souvent multilatérales[3]. Ce ne serait pas tellement gênant s'il n'y avait en outre la nécessité, même à un niveau théorique et grossier, de prendre en compte les différents retards temporels dans les opérations de traitements et de transmissions de ces relations multilatérales à l'intérieur du graphe. Car les différences entre ces laps de temps participent de la mise en œuvre de certains comportements spécifiques cruciaux d'un point de vue organique. D'autre part, Rosen indique que la représentation de l'organisme par un diagramme de blocs a l'inconvénient d'introduire un composant qui n'en est pas véritablement un, mais qui envoie des entrées dans beaucoup de composants du graphe et qui reçoit toutes les sorties qui ne sont pas connectées aux composants internes à l'organisme : il s'agit du composant « environnement de l'organisme », noté

[1] Dans le numéro 4 du volume 20 du *Bulletin of Mathematical biology*. Voir [Rosen, R., 1958b].
[2] [Rosen, R., 1958b], p. 318.
[3] Voir sur ce point [Rashevsky, N., 1966a], p. 292.

E par Rosen[1]. Comme son statut n'est pas bien défini et qu'il est aux frontières des autres composants de par son comportement formel aux limites (avec des effets de bord si l'on peut dire), lors de la démonstration de théorèmes généraux, il oblige à des traitements à part qui complexifient les raisonnements, en les particularisant et en affaiblissant l'intuition qu'on en peut avoir. Il serait donc bon, pour Rosen, de disposer d'une représentation qui le fasse entrer dans le rang des autres composants. Comme on peut le voir, ce choix liminaire signale, plus que d'autres, que Rosen pourchasse ici la dispersion symbolique et recherche, comme son maître, l'unification.

Après avoir établi cette liste des difficultés inhérentes à la représentation par diagrammes de blocs, Rosen signale qu'en théorie toutefois, il ne serait pas impossible de complexifier le graphe en vue de leur règlement. Mais il expose contre cela un argument, selon nous décisif, pour la justification du passage à un autre type de représentation mathématique :

« Bien que nous puissions, dans une certaine mesure, passer outre les difficultés que nous avons mentionnées par l'introduction d'un certain nombre d'astuces techniques, la théorie qui en résulterait aurait perdu la clarté intuitive *qui constituait une grande partie de son attrait. »*[2]

Cet argument nous paraît très important puisqu'il indique nettement le moment où, selon Rosen, il devient plus utile, en biologie théorique, de renoncer au caractère aisément visualisable des formalismes que l'on défend. Autrement dit, il nous révèle, par là, deux choses. Premièrement, il avait auparavant lui-même choisi une première représentation formelle par diagramme de blocs parce que l'intuition visuelle pouvait y soutenir l'abstraction mathématique. Deuxièmement, on doit selon lui abandonner un formalisme non pas précisément lorsqu'il ne permet plus aucunement de représenter une complexité biologique supplémentaire qu'on voudrait lui voir traiter (il est en fait souvent possible en théorie de pousser un formalisme dans ses retranchements), mais seulement à partir du moment où le gain que l'on aurait à l'utiliser dans ces nouvelles conditions devient nul par rapport aux formalismes plus abstraits auxquels on l'avait jusque là préféré. Le choix que fait Rosen pour l'abstraction mathématique paraît donc mûrement pesé en l'occurrence. C'est, selon ses dires, pour cette raison qu'il qualifie le contenu de son article comme étant l'exposé d'une « théorie de la représentation »[3] des systèmes. Les représentations que proposera cette théorie devront cependant posséder un pouvoir de simplification et de clarification :

« On verra que, bien que la théorie qui résulte paraît être, au commencement, plus compliquée que le traitement précédent, nous pouvons formuler nos résultats, et même nos définitions, d'une manière plus simple, plus intelligible et plus précise que cela n'est possible au moyen d'un raffinement de notre autre approche. »[4]

Autrement dit, c'est en élevant d'un degré l'abstraction mathématique de la représentation des organismes vivants que l'on pourra, assez paradoxalement, retrouver la possibilité d'en intuitionner les comportements de façon formelle, générale et précise. Du moins est-ce ce que

[1] [Rosen, R., 1958b], p. 318.
[2] "Although we may to a certain extent overcome the difficulties we have mentioned by the introduction of a number of technical devices, the theory which results will have lost the intuitional clarity which constituted a large part of its appeal", [Rosen, R., 1958b], p. 318. C'est nous qui soulignons.
[3] "representation theory", [Rosen, R., 1958b], pp. 318, 326 et 332.
[4] "It will be seen that, although the theory which results seems at the outset to be considerably more complicated than our previous treatment, we can formulate our results, and even our definitions, in a simpler, more intelligible and more precise fashion than is possible through any refinement of our other approach", [Rosen, R., 1958b], p. 319.

Rosen espère. Il est très vrai que la « théorie des catégories » appelée également la « théorie des équivalences naturelles »[1] a précisément été conçue pour mettre au jour les « transformations naturelles » qui laissent invariantes les bonnes constructions mathématiques[2]. Par construction, l'idée de « naturalité » qu'emploie la « théorie des catégories » n'a donc *a priori* pas grand-chose à voir avec la naturalité à laquelle sont confrontées les sciences de la nature. Mais Rosen suppose que, par analogie, les mathématiques semblant gagner toujours elles-mêmes à produire des théories plus abstraites sur leurs propres théories déjà existantes[3], il y a lieu de s'attendre à ce que le fait de s'élever, par abstraction mathématique, au-dessus de l'application de la topologie graphique soit également fécond pour la biologie théorique. En ce sens, ce que propose Rosen est une biologie mathématique du second degré, si l'on peut dire, puisqu'il s'agit d'y abstraire et d'y purifier une représentation théorique déjà existante. C'est pourquoi, encore une fois, il nomme sa suggestion une « théorie de la représentation ».

En effet, si on considère un composant M qui reçoit plusieurs entrées mais qui n'émet qu'une seule sortie, on peut noter Ai (i = 1, …, n) les n ensembles des différentes valeurs d'entrées possibles sur le composant M, et B l'ensemble contenant les valeurs de sortie possibles de M. Dès lors, on peut « regarder l'effet de M comme une application ou une transformation qui assigne à tout m-uplet (a1, …, an), ai $\in$ Ai un objet défini b $\in$ B »[4]. C'est-à-dire qu'on associe à tout composant M du graphe initial une application f telle que :

$$f : A1 \times \ldots \times Am \rightarrow B$$

C'est cette application associée qui devient la nouvelle représentation du composant M. Ce qui a pour effet immédiat de déréaliser ou, tout au moins, de déconcrétiser la notion ambiguë de « composant », et donc d'aller dans le sens préconisé par Rashevsky.

Ensuite, en généralisant et en omettant la restriction initiale à une seule sortie, on peut considérer que B est remplacé par un ensemble de sorties admissibles Bk. Et à chaque sortie Bk de M, on associera une application fk de même forme que précédemment. De façon plus générale donc, tout composant M est alors représentable par un *ensemble d'applications* (f1, …,fk,… fn) du produit cartésien A1 $\times$ … $\times$ Am sur l'ensemble des valeurs de sortie B et où n est le nombre de sorties de M[5]. À ce niveau-là, Rosen fait remarquer qu'il y a déjà un gain intuitif indéniable :

« Nous pouvons observer que le fait de regarder un système biologique comme un ensemble d'applications incorpore la plupart de nos notions intuitives au sujet de ces systèmes d'une manière extrêmement naturelle. »[6]

---

[1] [Rashevsky, N., 1960b], p. 393.

[2] Voir [Lavendhomme, R., 2001, p. 274 : « En général, on peut dire qu'une bonne construction mathématique doit être résistante aux transformations naturelles [c'est-à-dire aux transformations d'un foncteur en un autre et qui commutent : voir *ibid.*, pp. 273-274.]. Elle doit être 'naturelle'. C'est en fait avec l'idée de naturalité que S. Eilenberg et S. Mac Lane ont débuté leur réflexion sur les catégories. Il y a, en mathématiques, des constructions qui dépendent de certains choix pour être exécutées, alors que d'autres sont, comme on dit, canoniques, c'est-à-dire ne dépendant pas de choix adventices. Ce sont ces dernières qui donnent lieu à des transformation naturelles et c'est pour éclaircir cette idée que la notion de transformation naturelle a été créée. »

[3] Voir les propos enthousiastes du mathématicien Jean Dieudonné au sujet des « montées nouvelles dans l'abstraction » en mathématiques *in* [Taton, R., 1964, 1995], p. 20.

[4] "then we can regard the effect of M as a *mapping* or transformation, which assigns to every m-uple (a1,…, am), ai $\in$ Ai, a definite object b $\in$B", [Rosen, R., 1958b], pp. 319-320.

[5] [Rosen, R., 1958b], p. 320.

[6] "We may observe that regarding a biological system as a set of mappings incorporates most of our intuitive notions about these systems in an extremely natural way", [Rosen, R., 1958b], p. 320.

Autrement dit, l'intuitif se retrouve « incorporé » dans l'abstractif de deuxième niveau. Pour nous en convaincre, Rosen rappelle la définition d'un *foncteur* covariant :

La théorie des catégories

En 1945, Samuel Eilenberg et S. Mac Lane publient un article retentissant dans les *Transactions of the American Mathematical Society* : « *General Theory of Natural Equivalences* ». Il s'agit d'y présenter une théorie mathématique qui généralise et serve à traiter avec le même ensemble de concepts des notions comme celle d'isomorphisme, valant en algèbre, ou celle d'homéomorphisme[1], valant en topologie algébrique. Eilenberg et Mac Lane définissent pour ce faire une *catégorie*. Elle consiste en cet ensemble de données[2] :

1- Une collection d'*objets* qui seront désignés par A, A', …

2- Une fonction assignant à chaque paire (A, A') d'objets dans la catégorie, un ensemble que l'on appelle H (A, A'), et dont les éléments sont appelés des *applications* ou transformations[3]. f étant un élément de H (A, A'), on dit que A est le *domaine* (« *domain* »)[4] ou *source*[5] de f, et A' la *portée* (« *range* ») ou le *but* (resp.) de f.

Rosen commente ces premières données en disant qu'il s'agit là en effet du minimum exigible que l'on doive se procurer pour construire la théorie d'un ensemble d'applications : des objets mathématiques sur quoi agissent des applications et ces applications elles-mêmes. La définition de la catégorie ne s'arrête pourtant pas là sinon elle n'aurait pas d'intérêt opératoire. Il est en effet nécessaire d'introduire des moyens de « combiner » ou de « composer »[6] ces applications. Ainsi on va construire une sorte d'algèbre sur ces applications f pour les comparer entre elles ainsi que les structures qu'elles dessinent.

3- Dans une catégorie, il doit donc aussi exister une fonction appelée *composition* qui assigne à toute paire (f, g) d'applications telles que $f \in H(A, A')$ et $g \in H(A', A'')$ un application gf dans l'ensemble H(A, A'')[7]. On obtient alors un diagramme *commutatif* entre A, A' et A''[8]. Rosen identifie ce diagramme à son précédent diagramme de blocs.

[1] [Rosen, R., 1958b], p. 322. Voir la définition rigoureuse d'un homéomorphisme *in* [Ramis, E., Deschamps, C. et Odoux, J., 1976, 1988], p. 43 : « Soient E et F des espaces topologiques. On appelle homéomorphisme de E sur F toute bijection continue de E sur F, dont la bijection réciproque est continue sur F. Deux espaces topologiques sont dits homéomorphes si et seulement s'il existe un homéomorphisme de l'un sur l'autre. » Pour la notion de « bijection continue » définie à partir des notions d'« ouvert » et de « voisinage », voir *ibid*., p. 42.

[2] Nous nous inspirons ici des présentations simplifiées de Rosen lui-même ([Rosen, R., 1958b], pp. 320-321) et de René Lavendhomme ([Lavendhomme, R., 2001], pp. 263-265.

[3] Rosen précise que cet ensemble H (A, A') peut être vide, c'est-à-dire qu'il peut n'y avoir aucune application de A sur A'. Voir [Rosen, R., 1958b], p. 321.

[4] Selon la version de Rosen, [Rosen, R., 1958b], p. 321.

[5] Selon la version de [Lavendhomme, R., 2001], p. 263.

[6] "combining or composing", [Rosen, R., 1958b], p. 321.

[7] [Rosen, R., 1958b], p. 321.

[8] [Rosen, R., 1958b], p. 321. Rosen rappelle ici deux catégories (plus concrètes !) que Eilenberg et Mac Lane donnent en exemple : une première catégorie pourrait définir tous les groupes (au sens de l'algèbre) comme ses objets et les homomorphismes (applications qui respectent la composition, l'inverse et l'élément neutre dans les groupes, [Lavendhomme, R., 2001], p. 262) entre deux de ces groupes comme ses applications. Une seconde catégorie aurait pour objets la totalité des espaces topologiques et pour applications les applications ou transformations continues entre ces espaces.

Pour que le concept de catégorie soit applicable aux notions que l'on connaît déjà, il faut enfin y adjoindre trois axiomes : toute application d'une catégorie doit n'avoir exactement qu'un domaine et qu'un seul champ, la composition d'application est associative et, enfin, il existe une application identité i_A de tout objet A sur lui-même. Dès lors on peut définir une sous-catégorie : elle conserve l'application identité, la composition entre applications, comme les domaines et les portées de ses applications[1].

Si **A** et **B** sont deux catégories (voir encadré), un foncteur covariant T de **A** sur **B** est une paire d'applications qui à tout objet de **A** associe un objet de **B** et à toute application de **A** associe une application de **B**, et où T(gf) = T(g) T(f), et $T(i_A) = i_{T(A)}$. Un foncteur est *fidèle* si T(f) = T(g) implique que f = g, et si, lorsque gf = i_A, et que l'on a de plus T(A) = T(A') et T(f) = $i_{T(A)}$, cela implique que A = A'. Dans ce dernier cas où gf = i_A, g et f sont appelées des *équivalences* des objets A et A'. Si **A** est une catégorie de groupes, ce sont des isomorphismes, si elle est une catégorie d'espaces topologiques ce sont des homéomorphismes[2]. Enfin une catégorie est dite enchâssée (« *embedded* »)[3] en une autre catégorie **B** par un foncteur T, si T est un foncteur fidèle de **A** sur **B**[4]. L'image de **A**, notée T(**A**), est alors une sous-catégorie de la catégorie **B**.

Eilenberg et Mac Lane montraient alors le théorème suivant : « toute catégorie abstraite **A** peut être enchâssée dans la catégorie **S** dont les objets consistent en tous les ensembles de la théorie des ensembles et dont les applications rassemblent la totalité des applications de plusieurs de ces ensembles sur un seul ensemble (« *many–one mappings* »)[5]. Ce théorème est important pour Rosen car il permet de remplacer les objets d'une catégorie par un *ensemble* équivalent au regard de la théorie des catégories. Ce qui autorise la définition d'unions, d'intersections d'objets, etc., et oriente en effet le formalisme vers la prise en compte intrinsèque des relations multilatérales telles qu'elles caractérisent l'organisme.

« Diagramme de blocs abstrait » et « forme canonique » du système équivalent

Après ces nécessaires rappels de la théorie mathématique, Rosen peut enfin passer à l'adaptation de la théorie mathématique à l'objet qui le préoccupe. Pour ce faire, il suffit de partir d'une catégorie quelconque et de remarquer que l'on peut construire à partir d'elle un graphe orienté, ou ce qu'il appelle un « diagramme de blocs abstrait » (« *abstract block diagram* »[6]), en y choisissant certains objets comme certaines des applications de ses objets les uns sur les autres. À chaque objet choisi correspond un sommet et à chaque application correspond une arête orientée du graphe. Deux objets seront connectés dans le diagramme s'il existe une application choisie qui inclut l'objet de départ dans son *domaine* et l'objet d'arrivée dans sa *portée*.

Dès lors Rosen insiste sur le fait que chaque composant du système est désormais représenté par une collection d'applications dans le diagramme et dont toutes possèdent un domaine commun[7]. Puis il met l'accent sur l'idée que l'on peut considérer n'avoir affaire ici qu'à

[1] [Rosen, R., 1958b], p. 322.
[2] [Rosen, R., 1958b], p. 323.
[3] [Rosen, R., 1958b], p. 323.
[4] On montre auparavant que l'image d'une catégorie par un foncteur est toujours une sous-catégorie de la catégorie cible.
[5] "*Theorem 1.* Any abstract category A can be embedded as a subcategory of the category S, the objects of which consist of all sets and the mappings of which are the totality of all set-theoretical many-one mappings of sets", [Rosen, R., 1958b], p. 323.
[6] [Rosen, R., 1958b], p. 324.
[7] [Rosen, R., 1958b], p. 325.

des ensembles avec toute la souplesse que l'approche de la théorie des ensembles peut donner. Ce faisant, Rosen répond bien aux critiques de son maître Rashevsky et en opérant un peu de la même façon que lui : il a montré que son approche par les catégories pouvait, au moins en théorie, englober l'approche topologique ensembliste des objets biologiques que préconise par ailleurs Rashevsky. De plus, on ne peut plus l'accuser de découper le corps vivant en parties physiques amorphes au détriment du caractère relationnel et fonctionnel de l'organisme puisque le terme de « composant » est remplacé par celui d'« objet » d'une catégorie, et on peut montrer par là que cet « objet » est conceptuellement équivalent à un « ensemble » pris dans la catégorie générale de la théorie des ensembles. Rosen s'attarde sur ce qu'il appelle cet effet d'inversion dû au passage aux catégories : les sommets sont devenus des collections d'applications, les flèches sont devenues les objets de la catégorie. Il montre ensuite aisément comment cette nouvelle représentation supprime les difficultés que rencontrait le diagramme de blocs (unicité des entrées et des sorties des composants, existence du composant environnement)[1].

Par la suite, Rosen tâche d'employer la formulation en catégories pour représenter la transformation d'un système biologique au cours du temps. Mais avant cela, il s'agit de se donner les moyens de simplifier au maximum la représentation sous forme de catégorie d'un diagramme de blocs abstrait car pour chaque diagramme, il existe *a priori* un grand nombre de catégories qui pourraient lui convenir. Mais ces catégories possèdent en général un nombre d'applications et d'objets souvent inutilement élevé. On peut ainsi mettre en évidence l'existence d'une forme canonique (ou minimale) de cette représentation catégoriale au moyen d'un procédé de factorisation[2]. On dispose alors d'une représentation qui est au plus près de ce que l'on sait du système. Comme de plus, dans ce formalisme, les entrées et sorties sont traitées une à une comme des « objets » de la catégorie, il est théoriquement possible d'y faire intervenir explicitement les décalages temporels tels qu'ils existent dans les systèmes biologiques réels. Mais Rosen ne parvient à prouver aucun résultat général en ce domaine : on peut simplement montrer que lorsque certains composants du système présentent des sorties défectueuses, il est possible que le système se « contracte » sur un sous-système et que des effets d'empoisonnement interviendront parfois dans ces conditions pour un autre composant[3]. Le résultat sur ce point est donc décevant car l'apport théorique est maigre au regard de la méthode de formalisation antérieure. Enfin, Rosen utilise la notion de foncteur (à laquelle il est obligé d'ajouter des propriétés supplémentaires) pour se donner un outil de comparaison entre organismes tel que celui que Rashevsky s'était donné avec le principe de l'épimorphisme. Il arrive ainsi à montrer que l'image par un foncteur fidèle d'un « diagramme de blocs abstrait » valant pour un système biologique de départ est un autre « diagramme de blocs abstrait » pouvant valoir pour un autre organisme dit équivalent au premier. Mais Rosen avoue ne pas avoir les moyens de montrer si l'équivalence biologique (fonctionnelle) entre organismes est directement traduisible en termes d'équivalence catégoriale mathématique *via* un foncteur de ce type. Dit autrement : il ne sait pas si le diagramme des équivalences biologiques et mathématiques commute. C'est selon lui un problème très difficile. Le gain sur ce point est donc là encore très mince.

[1] [Rosen, R., 1958b], p. 327.
[2] [Rosen, R., 1958b], pp. 328-332.
[3] [Rosen, R., 1958b], p. 333.

Confirmation par la théorie des « réseaux de neurones » et la « théorie des automates » : application de la théorie des catégories et fin

Ce qui est tout à fait singulier, mais cohérent, dans le propos de Rosen, c'est le fait qu'il ne présente pas son travail comme l'application ou l'extension de la théorie des automates ou des neurones formels, mais plutôt comme une théorie de ces théories. Comme Rashevsky avait voulu « s'assimiler » sa première proposition théorique et la cybernétique, Rosen veut « s'assimiler » les formalismes modernes issus de l'ordinateur et qui s'imposent à lui. Il veut les « digérer » en quelque sorte, en faire abstraction, au sens propre comme au sens figuré, pour ne plus en dépendre. C'est la raison pour laquelle son second article de 1958 se conclut sur l'adaptation de ce qu'il appelle « la théorie générale des automates de McCulloch-Pitts-von Neumann » à sa « théorie de la représentation » des systèmes au moyen des catégories. Et il parvient en effet assez simplement à montrer qu'un automate général au sens de von Neumann, consistant en un réseau d'automates[1] à une entrée, peut être représenté comme « une application [de catégorie] dont la portée est l'espace A = {0, 1} du jeu de pile ou face et dont le domaine est le produit cartésien de A avec lui-même, pris un nombre de fois égal au nombre d'entrées dans l'automate »[2]. Ainsi, un automate général peut toujours être représenté par un « diagramme de blocs abstrait » dans une catégorie convenablement définie.

Pour Rosen, l'automate général est une confirmation, « empirique » pourrait-on dire, une « illustration » dit-il[3] lui-même, de sa théorie de la représentation. Car l'aspect graphique (au sens de la théorie des graphes) de la « théorie générale des automates » de von Neumann est, selon lui, une *conséquence* du formalisme plus général qu'il a adopté lui-même avec la théorie des catégories. Pour lui, de même qu'aux yeux de Rashevsky les antibiotiques auraient pu être prédits par la biotopologie, la « théorie générale des automates » aurait pu être entièrement dérivée *in abstracto* du point de vue catégorial qu'il propose. La théorie des automates n'apparaît donc pour lui ni nécessaire ni décisive.

Il n'en demeure pas moins que le succès que Rosen obtient est finalement très mitigé par rapport aux espoirs qu'il avait fondés en cette nouvelle théorie mathématique. Même si Rashevsky est admiratif, notamment devant les nouveaux théorèmes que son élève démontre pour l'occasion (il citera d'ailleurs souvent ce travail), les dernières pages du second article de 1958 ne parviennent pas à effacer l'impression que les problèmes les plus importants ne sont pas beaucoup mieux traités par ce formalisme que par les précédents. Devant le faible gain qu'apporte en définitive à la biologie théorique cette approche catégoriale, Rosen ne continuera pas à la développer et ses collègues n'y feront que peu d'emprunts[4]. Mais cela lui sera une leçon dans sa réflexion ultérieure sur notre faculté de représenter formellement les systèmes biologiques. Nous n'en dirons pas plus ici sur sa carrière[5]. Mais qu'il nous suffise de préciser que dans son ouvrage

[1] "An automaton consists, in the first approximation, of a black box and a finite number of inputs and outputs, each of which satisfies the special property that it is capable of assuming precisely two observable states", [Rosen, R., 1958b], p. 337.

[2] "as a mapping the range of which is the 'coin-tossing space' A, and the domain of which is a cartesian product of A with itself, taken a number of times equal to the number of inputs to the automaton", [Rosen, R., 1958b], p. 337.

[3] [Rosen, R., 1958b], p. 340.

[4] Voir les titres des travaux de quelques uns des derniers étudiants de Rashevsky cités *in* [Rashevsky, N., 1966c], pp. 660-661. Ils se concentreront davantage sur le principe de la conception optimale ou sur de nouvelles approches, matricielle par exemple, du principe de l'épimorphisme.

[5] Indiquons simplement qu'il obtiendra ensuite un poste au *Center for Theoretical Biology* de l'Université d'Etat de New York, à Buffalo, puis à l'Université Dalhousie où il terminera sa carrière comme professeur émérite. Une liste assez complète de ses travaux se trouve dans son dernier ouvrage [Rosen, R., 2000], pp. 343-345. Dans ce livre, qui a été collationné par sa fille, Judith Rosen, les deux articles de 1958 ne sont pas cités. Pour sa famille ou pour lui-même, sa

posthume de 2000, il reprendra le même formalisme que celui de son premier article de 1958 mais pour servir à une toute autre démonstration[1]. Significativement, en 1964, Rosen publiera encore un article sur les systèmes biologiques abstraits conçus comme « machines séquentielles »[2]. Depuis les publications du mathématicien américain S. Ginzburg, en 1962[3], il avait en effet été suggéré que le terme antérieur de « boîte noire » soit remplacé par celui, plus précis, de « machine mathématique séquentielle ». Mais il n'en demeure pas moins qu'il s'agit là, pour Rosen, d'une sorte de retour à la représentation mathématique (inspirée par la technologie et la théorie des automates) telle que celle à laquelle il avait eu recours dans son premier travail.

De son côté, avec du recul, et alors qu'il a quitté l'université de Chicago (en 1965) pour sa retraite et pris un poste au *Mental Health Research Institute* de l'université du Michigan – Ann Arbor, Rashevsky constate que cette approche par la théorie des catégories (qu'il cite et admire toujours) n'a finalement pas résolu un problème pour lui encore essentiel : celui de la représentation mathématique de ces relations à la fois multilatérales, complexes d'un point de vue temporel et qui caractérisent le fonctionnement d'un organisme[4]. Elle a certes eu l'intérêt de montrer que l'on pouvait employer un formalisme mathématique encore plus général que celui de la topologie. Mais elle n'a pas eu d'autres applications que celle que Rosen avait su trouver à la fin de son article dans sa dérivation de la théorie des automates[5].

Reconnaissance tardive de la « modélisation mathématique » par la tradition de la biophysique théorique (1960)

Nous avions remarqué qu'à partir de 1954, Rashevsky s'emploie à désigner les travaux antérieurs de la biophysique comme autant de « modélisations physico-chimiques » de la réalité biologique. Jusqu'en 1960, il ne sera donc jamais question, dans ses écrits de « modélisation *mathématique* », proprement dite. Car au moment où, sous l'influence grandissante de son désir de trouver des grands principes biologiques (relancé par les travaux de Cohn), il met en place sa biotopologie, les mathématiques ne sont pas du tout interprétées par Rashevsky comme un médium au moyen duquel on modélise. Mais, plus fondamentalement et donc moins superficiellement selon lui, les mathématiques sont interprétées comme le seul langage dans lequel on peut produire une théorie du réel biologique qui soit précise et testable. C'est le langage même des théories. L'expression « modèle mathématique » aurait donc été un oxymore, une contradiction dans les termes. Là s'exprime un mathématisme encore non feuilleté, si l'on peut dire. Entre 1954 et 1960, la théorisation mathématique directe est effectivement fermement opposée à la conception de modèles physico-chimiques. Dans la perspective de la biologie relationnelle, ces derniers sont réputés par Rashevsky et ses collègues (dont Rosen) ne valoir que pour des cas particuliers ; ils figurent autant de réalisations plausibles mais toujours révisables des fonctions organiques réelles. On produit un modèle physique lorsque l'on veut représenter

---

bibliographie commencerait donc seulement en 1959… C'est en effet la date à partir de laquelle il va commencer à remettre fondamentalement en question l'idée même selon laquelle il est possible de représenter formellement un système biologique par un automate ou par un quelconque mécanisme mathématique. Cette thèse sera par la suite son cheval de bataille, jusqu'en 1998, date de sa mort. Auparavant, il avait fait chaleureusement écho aux prises de position de René Thom en ces matières.

[1] Voir [Rosen, R., 2000], pp. 261-263.

[2] "Abstract Biological Systems as Sequential Machines", *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 1964, vol. 26, pp. 103-111, cité dans [Rashevsky, N., 1968], p. 258.

[3] *An Introduction to Mathematical Machine Theory*, Reading Mass., Addisson-Wesley Publ. Co., 1962, cité par [Lindenmayer, A., 1968a], pp. 281-282 et 299.

[4] [Rashevsky, N., 1966a], p. 292.

[5] [Rashevsky, N., 1960a], Tome 2, p. 394.

mathématiquement une fonction organique séparée afin d'en prédire l'évolution. On a alors la possibilité de rendre métrique cette représentation. Ce qui permet de donner une prédiction précise. Mais, ce faisant, on isole indûment (à la fois spatialement, temporellement et fonctionnellement) cette fonction du reste de l'organisation de l'être vivant et l'on ne dispose pas de la possibilité d'en *rendre raison* ni donc d'en prédire *l'existence même* dans l'organisme. Les modèles physiques s'occupent donc de *prédire* quantitativement le *comportement* de ce qu'ils ont auparavant représenté partiellement et par un formalisme métrique. Ils *supposent connue* l'existence de certaines fonctions et de certains fonctionnements. Mais ils ne sont pas capables de *prédire une existence*. En ce sens, ils n'expliquent pas la raison d'être des organismes ni de leurs propriétés. Au contraire, au principe de l'épimorphisme topologiquement exprimé, revient le mérite de cette explication. C'est en ce sens que cette nouvelle mathématisation est réputée représenter directement, c'est-à-dire sans le soutien d'un modèle physique, ce qui est qualitatif donc essentiel dans l'organisme.

Or, souvenons-nous que c'était au départ face à la difficulté de produire une théorie physico-chimique de la morphologie et de la morphogenèse des êtres vivants que Rashevsky avait fait, à partir de 1944, une première entorse à son réductionnisme physicaliste. Il avait introduit une sorte de niveau intermédiaire pour la mathématisation : une mathématisation directe de ces qualités génériques que l'on trouve intuitivement présentes chez tout organisme (d'où sortira le « principe de la conception optimale ») et qui serait à situer entre la mathématisation physico-chimique microscopiquement orientée et la mathématisation abstractive ou statistique qui se trouve être populationnelle et macroscopiquement orientée. Or, en 1954, ce sont ces qualités manifestes, intuitives, caractéristiques du vivant, qu'il pense devoir désormais *directement* saisir dans ses formulations topologiques. Ce qui était d'abord intuitif et global est bien en fait ce qui sera réputé être, à ce moment-là, le plus profond et le plus fondamental dans l'organisme, puisque le plus partagé à travers le monde organique.

C'est qu'il n'a cessé en fait de supposer l'unité, sous un ou sous quelques principes généraux, de ce monde organique. Et c'est bien le sens final qu'il donne à l'expression qui lui est chère « *The organism as a whole* ». Or, le principiel, une fois mis en avant et directement mathématisé, ne pourra plus passer que pour du théorique et non pas pour un modèle parmi d'autres. Voilà, selon nous, la raison précise pour laquelle cette mathématisation directe de l'organique est encore bien loin d'être simplement conçue comme une forme nouvelle de modélisation par la tradition biophysique d'avant 1960. Selon Rashevsky, c'est une théorisation, c'est même la théorisation par excellence du biologique en tant que tel.

Le passage à la reconnaissance définitive de l'existence d'une « modélisation mathématique » par l'école de biophysique de Rashevsky ne se fera donc qu'un peu plus tard, à partir de 1958, en particulier face aux premiers travaux (brillants par leur force théorique mais aux succès bien relatifs) de Robert Rosen. Pour que cette expression ne soit plus un oxymore, il a en effet fallu quelques déplacements supplémentaires décisifs. C'est bien à la suite de l'onde de choc qu'a fait subir à Rashevsky et à son entourage la publication des travaux de Rosen que l'expression de « modèle topologique » est entrée en usage. Autrement dit, avec Rosen, Rashevsky découvre que le langage de la théorie par excellence, les mathématiques, peut être utilisé à d'autres fins qu'à la théorie. À sa grande surprise, Rashevsky découvre que les mathématiques sont feuilletées. Elles peuvent en l'occurrence ne pas se réduire au seul énoncé théorique des principes biologiques généraux. Au contraire, une axiomatique mathématique, même très abstraite, peut être mise au service d'une représentation mimétique structurelle *sans qu'il y ait pour autant la médiation d'un substrat physique*. Avec le « modèle topologique » de

l'organisme, Rashevsky rencontre donc son premier « modèle mathématique » au sens strict. Mais c'est la publication de Rosen sur la théorie des catégories qui va achever ce processus de reconnaissance des modèles mathématiques, cette fois-ci dans leur diversité, par l'école biophysique de Rashevsky. Car, en ne faisant de l'approche par automate ou par graphes topologiques que des approches mathématiques parmi d'autres et pouvant toujours être subsumées sous une théorie mathématique plus abstraite, Rosen démontre à Rashevsky et à ses collègues biophysiciens qu'*à l'intérieur même des mathématiques*, on peut considérer qu'il y a des théories mathématiques plus abstraites que d'autres. Alors même que sa contribution pour le savoir théorique proprement dit de la biologie est maigre (sans même parler de son apport pour la science opérationnelle…), Rosen, en mettant en perspective et en « concrétisant » l'approche topologique de Rashevsky comme les diverses mathématisations directes (venant de la technologie des circuits, de la cybernétique ou de la théorie générale des automates) qui lui sont contemporaines, rend définitivement pensable la méthode des « modèles mathématiques » en biologie théorique, même pour la déjà vieille école de biophysique théorique. Sa « théorie de la représentation », en échouant à évincer les autres, en montre en revanche l'irréductible diversité comme la contingence. Les modèles mathématiques sont alors conçus comme des représentations mathématiques partageant ces dernières caractéristiques (diversité et contingence) avec les modèles physico-chimiques. Une représentation mathématique devient un « modèle mathématique » lorsque quelque chose de concret et de non totalement généralisable théoriquement peut y être perçu.

Rosen a finalement mis au jour et devant Rashevsky le fait que la gradation concret-abstrait se poursuit encore et continûment dans les mathématiques mêmes et que le rêve d'une mathématisation directe qui soit directement en prise avec l'essence des choses biologiques était peut-être une chimère. C'est la raison pour laquelle sa théorie des représentations se muera finalement en une théorie des analogies et de la modélisation mathématique[1].

Une autre preuve de l'érosion de la résistance : la nature transitoire des modèles mathématiques

Pourtant, Rashevsky ne suivra pas son élève tout à fait jusque là[2]. À partir de 1960, il accepte bien de parler de « modèle mathématique ». Et cela est nouveau. Mais il lui voit toujours peu ou prou un fondement physico-chimique. Le « modèle mathématique », ce n'est finalement pour lui que l'aspect mathématique d'un modèle physico-chimique ou d'une formalisation mathématique directe qui s'est avérée encore non principielle, donc non théorique. Dès lors, ce qui le préoccupe, dans sa dernière édition de *Mathematical Biophysics* (1960), c'est que l'on ne dispose pas, pour l'heure, de théorie mathématique unitaire qui traiterait les « activités *intégrées* »[3] de l'organisme conçu comme un tout alors qu'il s'agit peut-être de « la manifestation la plus

[1] Voir [Rosen, R., 1968a], p. 481, où Rosen expose "the theory of modelling of physical systems". L'objet de cet article est d'extraire la notion d'analogie de son habituelle compréhension en termes de correspondances physiques bi-univoques entre deux systèmes : il existe bien d'autres types d'analogies, soutient Rosen. Et c'est le passage par les mathématiques (par des diagrammes algébriques de commutation entre diverses représentations d'un système dynamique) qui lui permet de le montrer (*ibid.*, pp. 482-485). Ainsi « tout système peut être rendu analogue à un sous-système de n'importe quel autre système », *ibid.*, p. 481 ("Any system may be analogized as a subsystem of any other").

[2] Voici un témoignage de Rosen au sujet de la biologie relationnelle de Rashevsky qui confirme notre analyse : "I do not think that Rashevsky was fully aware of how radical his approach actually was. I do not think he was aware that he was doing new physics, or that his relational ideas are literally living violations of the constraints underlying the Newtonian simplifications [sur la mécanisation du monde et de ses représentations] I addressed previously", [Rosen, R., 2000], pp. 260-261.

[3] "*integrated* activities", [Rashevsky, N., 1960a], Tome 2, p. 306. C'est l'auteur qui souligne.

essentielle de la vie »[1]. Parce qu'ils ne prennent pas en compte cette intégration des fonctions organiques, les « modèles mathématiques », pour Rashevsky, restent toujours plus ou moins fondés sur des principes physiques alors qu'il faudrait des principes biologiques authentiques (qui resteraient certes en droit réductibles aux principes physiques). À ce titre, les « modèles mathématiques » actuels de la biologie (qui sont donc encore des modèles « physico-mathématiques » pour lui, mais rendus plus labiles par la contingence entre-temps reconnue des formalisations mathématiques) possèdent essentiellement une « nature transitoire »[2]. Selon Rashevsky, les « modèles mathématiques » sont des interprétations passagères et partielles des principes théoriques, généraux et encore très hypothétiques que recherche la biologie théorique. C'est la raison pour laquelle ces modèles ne peuvent s'appuyer le plus souvent que sur les principes qui sont véritablement reconnus, à l'heure où il parle : ceux de la physique. Ce n'est donc finalement que pour une raison accidentelle (et selon lui appelée à disparaître) que les modèles mathématiques de la biologie restent en même temps des modèles physico-mathématiques. Car, de son point de vue, la physique dispose déjà de ses propres principes, notamment avec les principes de Newton (relation fondamentale de la dynamique) ou avec la théorie de la Relativité Générale d'Einstein[3]. C'est pour cela qu'elle est mathématiquement théorisée. On y voit différents modèles se succéder, mais les principes, eux, demeurent.

Tel est finalement le modèle des modèles auquel se tiendra Rashevsky pendant toutes ces années 1960 : les « modèles mathématiques » de la biologie seront de véritables modèles biologico-mathématiques (et non plus « physico-mathématiques ») le jour où une théorie biologique nous fournira de véritables *principes mathématiques de la biologie*, stables et universels comme ceux de la physique. Alors la dispersion des modèles sera peut-être enfin contenue. Dans le même temps donc, la biophysique de l'ontogenèse, en se muant en une biotopologie et en une biologie relationnelle, aura développé des trésors de stratégies spéculatives pour marginaliser, en se les assimilant, les modèles à ordinateurs, ou automates, comme les modèles sur ordinateur. Les auteurs dont nous avons parlé ici ont trouvé leur planche de salut en puisant dans des ressources mathématiques nouvelles mais pour asseoir un point de vue ancien et pour le défendre dans un horizon quasi exclusivement spéculatif. Cependant, ils n'ont pas été les seuls à vouloir résister à la dispersion à quoi semble mener irrévocablement la modélisation du vivant et des formes.

[1] "the most essential manifestation of life", [Rashevsky, N., 1960a], Tome 2, p. 306.
[2] "a transient nature", [Rashevsky, N., 1960a], Tome 2, p. 307.
[3] [Rashevsky, N., 1960a], Tome 2, pp. 307-308.

CHAPITRE 14 – Thermodynamique et topologie différentielle des formes

Alors que de son côté, la biophysique théorique qui, naguère s'était occupée de la morphogenèse, fuit vers l'abstraction pour sa propre sauvegarde, et donc renonce de fait à traiter la mise en forme spatialisée et hétérogène des parties d'un être vivant, la place est libre pour qu'une autre réaction, cette fois-ci plus physicaliste se dresse devant la méthode dispersée des modèles et des simulations déracinées. Ces tentatives de réunifier les formalismes de la morphogenèse vont se faire au nom d'un substrat revendiqué comme commun mais dont le statut reste en fait un peu flou, voire fantomatique. L'appel à des concepts retravaillés et issus de la thermodynamique récente, ou même directement de l'intuition sensible (le *continuum* du réel pour Thom), est ce qui fait leur noyau propre. Nous verrons ici comment elles se sont toutes structurées, chacune encore une fois dans un souci de surplomb et d'unification des systèmes physico-chimiques et des systèmes biologiques. Cela a été leur réponse à l'éclatement et à la dispersion accrue des modèles sous l'effet de l'émergence de l'ordinateur.

Arbres fluviaux et arbres botaniques

Le premier événement qui incita certains biologistes de la forme à faire retour vers une explication physicaliste du phénomène de ramification eut son origine dans un domaine qui n'avait pas encore été considérablement travaillé de manière quantitative avant 1945. Il s'agissait de la géomorphologie fluviale. Au début des années 1970, en effet, la morphologie quantitative et causale vit encore sous la coupe d'une proposition spectaculaire qui avait vu la jonction entre des études d'hydrologie quantitative et les travaux biophysiques de Murray (1927) et de Cohn (1954) sur la ramification du système vasculaire. C'est cette approche qui va inciter de nouveau certains biophysiciens à une approche physicaliste pour le traitement formel des processus de ramification, cela par le biais d'une problématique d'optimisation hydraulique et énergétique des phénomènes de ramification en général[1].

Cette proposition est le fait d'un ingénieur en hydraulique, rattaché aux laboratoires de l'Université Cornell et du nom de Robert Elmer Horton (1875-1945). Pendant les nombreuses années qui ont précédé sa publication posthume de 1945, Horton avait travaillé à rendre quantitatives toutes les observations faites sur les écoulements fluviaux du sol américain, cela de manière à les synthétiser commodément. Il se concentrait sur le dimensionnement des réseaux fluviaux, notamment en vue de discerner les causes de l'érosion aqueuse. En tenant compte du nombre de branches à chaque ordre de ramification comme de la longueur moyenne de ces branches, Horton avait trouvé que, statistiquement, et pour un réseau hydrologique précis (donc pour un « arbre » fluvial précis), il existe une relation moyenne constante entre le nombre de branches qui se situent à un ordre de ramification donné et le nombre de branches se situant à l'ordre suivant, toutes branches confondues. Ce nombre est d'environ 3,5. C'est ce qu'il appela le « ratio de bifurcation ou de ramification ». De même, il trouva un « ratio de longueur » également assez constant et égal environ à 2,3. C'est-à-dire que la longueur moyenne d'une branche fluviale

[1] Voir [Barker, S. B., Cumming, G. et Horsfield, K., 1973], p. 33.

est 2,3 fois plus grande que la longueur moyenne d'un de ses rameaux[1]. Dans une perspective biométrique, Horton « déconstruisait » donc l'arbre en quelque sorte pour en classer, en décompter et en mesurer les branches, ordre de ramification par ordre de ramification.

Par la suite, ses travaux avaient été présentés par le géophysicien A. N. Strahler d'une façon plus simple et plus utilisable, ce qui les rendait potentiellement applicables en dehors du domaine de l'hydrologie. À partir de 1953, Strahler affectait ainsi des numéros aux ordres de ramification en partant des branches terminales de l'arbre. Cette formalisation numérique pouvait valoir pour tout type d'arbre, de quelque nature qu'il soit (botanique, fluviale, mathématique ou de décision) et elle permettait de tester simplement si ce qu'on appelait alors la « loi de Horton » s'appliquait également aux arbres non fluviaux dans les autres domaines empiriques considérés[2].

En fait, cette relation née dans l'hydrologie était bien phénoménologique au départ, puisque fondée sur des moyennes statistiques ; et elle ne commença à recevoir des ébauches d'explication de type thermodynamique de la part des géophysiciens qu'à partir du début des années 1960. C'est d'ailleurs à la suite de ces premiers essais d'explications physiques de la loi de Horton, au moyen d'une approche de type optimisation de structure *via* des considérations physiques, que, quelques vingt années après le travail posthume de Horton, le physicien et géomorphologiste américain Luna B. Leopold, alors Chef Hydrologiste au *United States Geological Survey* (USGS[3]), revient sur cette relation et suggère de la tester sur des arbres botaniques. Auparavant, dans des travaux de 1962 et 1964, Leopold avait lui-même proposé une explication de la « loi de Horton » en hydrologie en termes de thermodynamique des systèmes ouverts. En 1971, dans un article du *Journal of Theoretical Biology* sur l'efficacité des structures de ramification, où il rappelle d'abord l'esprit de ses premiers travaux de géophysicien, Leopold s'exprime ainsi:

« *La rivière comme un tout peut être visualisée comme un système ouvert en état stationnaire. On a trouvé que la condition de quasi-équilibre ou de stationnarité est susceptible d'être analysée en considérant que sa distribution d'énergie est analogue à l'entropie thermodynamique. L'état stationnaire dans le système représente un équilibre entre deux tendances opposées, dont l'une est la tendance à la minimisation de la dépense en puissance dans le système total et l'autre est la tendance à l'égalisation de la distribution de la puissance à travers le système.* »[4]

Chez Leopold, le transfert de l'explication thermodynamique de la physique de la chaleur à l'hydrologie est donc déjà lui-même fondé sur une analogie reconnue comme telle. C'est parce que les énergies de drainage des rivières sont assimilables à des distributions d'énergie dans un système thermodynamique théorique, que l'analogie semble valoir dans ce cas. Vient alors la seconde analogie, celle qui, selon lui, suggère le passage de cette même explication thermodynamique à la ramification des arbres botaniques :

---

[1] Voir [Leopold, L. B., 1971], pp. 341-342.
[2] Nous reviendrons plus bas sur l'impact des nombres de Strahler en informatique théorique.
[3] Institution dépendant du *U.S. Department of the Interior*, Département de l'Intérieur des Etats-Unis.
[4] "The river as a whole can be visualized as an open system in steady state. The quasi-equilibrium or steady-state condition has been found susceptible of analysis by considering its energy distribution analogous to thermodynamic entropy. The steady state in the river represents a balance between the opposing tendencies for minimum power expenditure in the whole system and equality of the distribution of power throughout the system", [Leopold, L. B., 1971], p. 345.

« *Par analogie, il semble possible que la structure de ramification des arbres et autres formes biologiques soient gouvernées par des tendances opposées qui soient analogues à la dépense minimale en énergie et à l'utilisation uniforme de l'énergie. Dans le cas des arbres, il pourrait être supposé que la première tendance implique la minimisation de la longueur totale de toutes les branches et de toutes les tiges. L'uniformité de l'utilisation de l'énergie pourrait concerner le fait de fournir une surface photosynthétique qui tendrait, selon certaines contraintes, à obtenir l'usage le plus efficace de la lumière du soleil.* »[1]

Un arbre ressemble donc à une rivière en ce qu'il est une structure spatiale qui alimente de façon distribuée et optimale une certaine surface, ou bien qui en est alimenté, si l'on considère la diffusion des produits de la photosynthèse des feuilles au reste de l'arbre[2]. Dans ces conditions, les feuilles sont considérées comme les analogues des zones de bassin des réseaux fluviaux. De même que le réseau fluvial semble optimiser la distribution surfacique en fonction de ses contraintes physiques, de même l'arbre botanique semble optimiser son alimentation en énergie solaire et en produits de synthèse.

Afin de vérifier si l'on obtient un « ratio de bifurcation » et un « ratio de longueur » constants sur un arbre botanique comme c'est le cas pour un arbre fluvial, Leopold se livre alors lui-même à quelques mesures statistiques sur un sapin[3]. Pour ce type d'arbres, il obtient bien des ratios constants, respectivement de 4,8 et de 2,7 (donc différents de ceux des arbres fluviaux, notons-le). Il semble ainsi que la « loi de Horton » s'applique également dans le domaine de la morphologie végétale. Mais Leopold recule devant toute analyse de variance systématique car l'analyse biométrique des arbres botaniques n'est pas son métier ; et il n'a ni les moyens ni le désir de la conduire. Son objectif est seulement d'attirer l'attention des biométriciens sur la possible mise en évidence par la statistique de l'existence de telles autres « lois de Horton » pour les arbres botaniques[4].

La deuxième partie du travail de Leopold consiste à tâcher de fonder en quelque sorte cette approche thermodynamique à prétention interdisciplinaire sur une technique apparentée à la physique statistique et qu'il a auparavant concrètement mise en œuvre, dans son propre domaine, pour la construction de réseaux artificiels de drainage optimaux. Son but est théorique : expliquer l'émergence assez générale de cette loi. Dans son contexte d'ingénierie hydrologique, Leopold était parti du principe que, la structure moyenne des arbres fluviaux était en fait le résultat d'un très grand nombre de facteurs concurrents. La compréhension de ce phénomène devait se fonder sur une approche plutôt stochastique que déterministe. Si on voulait imiter la faculté qu'a la nature de constituer des réseaux arborescents passablement optimaux, il devait donc être plus sage de recourir à des modèles stochastiques de ramification du type de ceux que la physique met en œuvre depuis le début du siècle avec les processus à « marche aléatoire »[5]. Le terrain hydrologique avait lui-même semblé donner raison à cette interprétation statistique de la « loi de

[1] "By analogy, it seems possible that the branching patterns of trees and of other biologic forms are governed by opposing tendencies which are analogous to minimum energy expenditure and uniform energy utilization. In the case of trees it might be supposed that the former involves minimizing the total length of all branches and stems. The uniformity of energy utilization might concern providing a photosynthetic surface which tends, under certain constraints, to obtain the most efficient use of sunlight", [Leopold, L. B., 1971], p. 345.

[2] "The stem system of a plant forms a structural support serving to expose photosynthetic organs to sunlight and at the same time to provide the routes for removing photosynthetic products from them", [Leopold, L. B., 1971], p. 339.

[3] Voir [Leopold, L. B., 1971], pp. 342-345. Sa technique se présente comme plutôt artisanale : il choisit des arbres et des ordres de ramification en fonction de leur accessibilité par un escabeau. Et il fait ensuite des estimations au juger pour les ordres les moins accessibles de cette manière…

[4] [Leopold, L. B., 1971], p. 345.

[5] [Leopold, L. B., 1971], p. 348.

Horton » en hydrologie. Mais comme les arbres botaniques se déploient en trois dimensions, il n'est pas *a priori* certain que cet autre transfert analogique, au niveau statistique cette fois-ci, vaille pour ceux-là alors que l'explication à l'échelle thermodynamique avait semblé, en revanche, déjà valoir pour eux, ainsi que nous l'avons vu précédemment pour le sapin. Cependant, comme il lui faut réellement construire des modèles stochastiques d'arbres botaniques pour tester cette transférabilité de l'interprétation statistique, Leopold n'est pas en position de fabriquer des arbres botaniques artificiels, alors qu'il lui a été en revanche possible de faire des réseaux fluviaux artificiels sur le terrain. Avec la tridimensionnalité de l'arborescence, c'est donc là une autre différence majeure entre les modèles en hydrologie et les modèles en morphologie biologique qui se manifeste : il n'est pas possible de fabriquer physiquement des arbres botaniques si l'on veut tester la pertinence de telle ou telle règle stochastique. Il reste certes la possibilité de recourir à des graphes stylisés, tracés au crayon sur du papier. Mais comme c'est le détail qui doit compter pour la mise en œuvre de ce genre de modèles (car on veut justement faire des statistiques sur les résultats de détail afin de voir s'ils se compensent globalement et convergent vers une forme obéissant globalement à la « loi de Horton »), Leopold avoue qu'il lui serait impossible de rendre clairs et lisibles de tels diagrammes dessinés d'une manière aussi complexe.

Comme il ne semble pas connaître ou maîtriser les usages de l'ordinateur, il utilise alors un jeu de bricolage, en fait un jeu de meccano pour enfants (« *Tinker – Toy* »[1]), et un jeu de cartes pour construire physiquement ses modèles stochastiques de ramification botanique et pour simuler le tirage de nombres aléatoires. Ses modèles stochastiques sont donc physiques. Pour faire apparaître l'aléa, il tire des cartes au hasard dans le jeu. Il choisit des règles de ramification tout à fait arbitraires[2] : une chance sur deux de ramifier après chaque pousse (en fonction de la couleur de la carte tirée : rouge ou noir), une chance sur deux de faire une longue ou une courte tige (idem), et des chances également équiprobables de ramifier selon un certain angle inférieur à 90° par rapport à la verticale (en fonction de la valeur de la carte tirée). Il réitère ainsi un grand nombre de fois la construction artificielle d'un tel arbre modèle et procède ensuite à l'analyse de Horton sur ces nombreux résultats, comme s'il s'agissait d'arbres réels : il trouve que ces arbres botaniques artificiels et modélisés de façon stochastique convergent en moyenne très vite vers la loi de Horton avec un « ratio de ramification » de 3,8 et un « ratio de longueur » de 2,6[3]. Même dans le cas des trois dimensions, ce résultat de convergence semble donc valable et il est de plus indépendant du substrat, qu'il soit organique ou non.

Leopold montre donc que la relation logarithmique de Horton est bien liée à un optimum de probabilité dans le cadre d'un processus stochastique quel qu'il soit, même très artificiel, ce qui justifie cette fois-ci plus formellement encore son interprétation thermodynamique transversale entre hydrologie et biologie[4] dès lors qu'elle semble constructible à partir d'une interprétation statistique. Leopold en a cependant conscience[5] : il ne s'agit pas d'une preuve théorique formelle car il se pourrait très bien que les autres contraintes biologiques intervenant dans les arbres botaniques réels ne se compensent pas toujours (à la différence du cas apparemment favorable du sapin) de manière à laisser systématiquement réapparaître au niveau global une loi de type

[1] [Leopold, L. B., 1971], p. 348.
[2] Il ne les cale donc pas sur une connaissance botanique précise. Mais cela n'a justement pas d'incidence à cause de la généralité du résultat qu'il veut indiquer.
[3] Ce qui ne rejoint pas, on pouvait s'en douter, les valeurs particulières mesurées statistiquement sur le sapin, par exemple. Mais là n'est pas l'objectif de Leopold : il lui suffit de montrer que ces nombres, résultats d'une convergence statistique, existent.
[4] [Leopold, L. B., 1971], p. 351. L'entropie d'un système est maximale quand les probabilités des états alternatifs sont égales, rappelle Leopold. Elle s'exprime alors comme le logarithme de la probabilité de cet état stable.
[5] [Leopold, L. B., 1971], p. 353.

Horton. L'approche thermodynamique se présente donc davantage comme un postulat théorique que l'on peut inférer à partir de certaines données et qui n'a de portée prédictive qu'à un niveau assez global. Pour les arbres botaniques, elle reste donc phénoménologique, même si la possibilité d'une explication statistique et thermodynamique grossière est rendue concevable par son travail empirique et de simulation physique sur les modèles en meccano.

Une telle suggestion appelle alors une réponse de la part de biologistes ou de botanistes. On doit pour cela faire des expériences plus systématiques sur les arbres botaniques afin de voir si cette hypothèse d'une optimisation thermodynamique se confirme plus généralement. Ce sera chose faite en 1973. Et la réponse sera très mitigée. Nous reviendrons sur sa nature dans un prochaine partie où nous exposerons en temps utile les raisons qui feront douter de ce genre d'approche physicaliste unificatrice : ces raisons sont précisément celles sur lesquelles se fonderont les premiers véritables botanistes à user de simulations sur ordinateur.

« Entropie généralisée » et phyllotaxie

À partir des années 1960, il est une autre voie que continuent à suivre certains biophysiciens en matière de forme. C'est celle de la phyllotaxie théorique. Nous avions vu que la botanique française, et plus généralement, la biologie française, n'a pas été très favorable au développement sur son sol d'une biologie théorique mathématisée, au contraire. Cependant, une première naissance de la biologie théorique française peut être attribuée à un groupe de physiciens et de médecins qui se sont associés au travail de recherche théorique assez marginal du médecin Francis Collot (né en 1924)[1]. Il se trouve que c'est partiellement dans ce contexte que certaines idées nouvelles, en rejoignant ensuite certains travaux effectués aux Etats-Unis et au Canada, vont renforcer l'étude de la phyllotaxie d'un point de vue physicaliste.

En tant que chirurgien, Collot s'était en effet spécifiquement intéressé à l'ostéogenèse. À côté de sa pratique médicale, dès les années 1950, il avait recherché quels étaient les modèles de croissance que proposaient les physiciens et biophysiciens en ce domaine. Et il avait pour cela plus particulièrement travaillé l'ouvrage publié en français en 1937 par le mathématicien V. A. Kostitzin, *Biologie mathématique*. À cette date, Kostitzin était professeur à la Faculté des Sciences de Moscou et directeur de l'Institut de Géophysique de Moscou[2]. Poursuivant une approche voisine de celles de Lotka et Volterra, Kostitzin partait des problèmes populationnels désormais classiques et il poursuivait ses propositions théoriques par quelques considérations sur la forme des êtres vivants. Même si son propos restait très prudent et pragmatique, il ne cachait pourtant pas son ambition de rechercher une certaine unité à tous les problèmes biologiques *via* leur formalisation mathématique[3]. De manière assez inédite cependant par rapport à Lotka et Volterrra, il mettait l'accent sur le « fond empirique » des mathématiques de manière à tempérer l'idée courante qui veut que l'on ferait toujours violence au vivant en le mathématisant[4]. Mathématiser, revenait simplement pour lui à « brûler les étapes » d'un raisonnement qui, sinon, pourrait être fait en langage naturel. C'est seulement en cela que les mathématiques simplifient et peuvent ensuite induire en erreur : on ne peut vérifier à chaque étape la conformité entre la formalisation et l'expérience, ce que fait en revanche le naturaliste.

[1] Voir notre entretien [Collot, F. et Varenne, F., 2004].
[2] Kostitzin avait été encouragé à cette publication par Prenant et Teissier avec lesquels il entretenait des rapports étroits.
[3] [Kostitzin, V. A., 1937], p. 11.
[4] [Kostitzin, V. A., 1937], p. 12.

Moyennant ces mises en garde destinées à autoriser une mathématisation lucide et réaliste, Kostitzin affirmait que les mathématiques, étant entrées en biologie par la voie de la statistique, devaient désormais passer au « stade analytique » auquel il rattachait les travaux pionniers de Lotka et Volterra : c'est le seul moyen de « remonter à la causalité des phénomènes et d'en déduire toutes les conséquences logiques »[1]. Et il précisait :

« Dans ce stade, des hypothèses même inexactes sur la nature intime des phénomènes sont souvent plus utiles que les lois empiriques calculées lege artis *avec tous les accessoires nécessaires. »*[2]

En ce qui concerne la forme des êtres vivants, Kostitzin se rattachait au principe, adopté notamment par Lotka, selon lequel cette forme obéit à un « principe de minimisation de dépense d'énergie », que ce soit pour l'entretien ou pour le mouvement. La rupture d'équilibre qui mène à la division cellulaire lui semblait contredire ce principe. Mais il renvoyait pour cela aux explications que Poincaré avait données pour le phénomène, similaire à ses yeux, de la création de systèmes de type Terre-Lune à partir d'une figure qui devait pourtant être préalablement en équilibre[3].

Devant ces suggestions plutôt vagues, Collot ne trouve pas de quoi réellement préciser la forme mathématique de ses modèles d'ostéogenèse même si l'épistémologie de Kostitzin lui agrée. Mais, entre-temps, en 1959, paraît *La science et la théorie de l'information* du physicien Léon Brillouin. À la fin de l'ouvrage, dans un bref passage, Brillouin suggérait que l'on puisse transposer son idée d'information contenue dans un « plan de montage » d'une machine d'ingénieur aux organismes vivants[4]. À partir de cette suggestion, Collot élabore progressivement ses notions de « complexité d'une structure » (1969) puis d'« entropie généralisée » (1973). Pour faire connaître ce travail sur la formalisation théorique des structures vivantes et pour tâcher de fédérer les recherches en ce domaine, dès 1962, il crée à Paris sa propre *Revue de Bio-mathématiques*. Par la suite, elle paraîtra toujours à compte d'auteur[5].

Dans sa perspective, Collot propose de considérer un être vivant comme une structure, squelettique en quelque sorte, dans laquelle des « sites » sont reliés par des arêtes ou « liaisons »[6]. Soit un nombre donné de sites et de liaisons, donc un graphe, la « complexité » est définie comme le « nombre de cas de figure ou aspects distincts possibles d'une telle 'structure' »[7]. Collot rejoint ainsi explicitement la notion de « configuration » proposée par Boltzmann dans sa théorie des gaz. Il peut alors tout naturellement définir une « entropie généralisée » à partir d'une telle définition de la complexité : cette complexité est en effet le nombre d'états virtuels possibles d'une structure donnée. L'entropie généralisée est définie proportionnelle au logarithme de l'inverse de cette complexité. Plus la complexité est grande, plus l'entropie généralisée est faible. Collot fait avec cela l'hypothèse forte que cette « complexité d'une structure » est une « bonne mesure de sa fonctionnalité » du point de vue biologique comme technologique (s'il s'agit par exemple d'un plan de montage ou d'un schéma directeur

[1] [Kostitzin, V. A., 1937], p. 13.
[2] [Kostitzin, V. A., 1937], p. 13. Plus loin (p. 14), il donne un exemple fictif : « Descartes statisticien ne découvrirait jamais la loi de réfraction ». Et il commente à la même page : « Cet exemple n'est pas du tout destiné à abaisser la méthode statistique, mais simplement à lui ôter ce caractère de passe-partout universel qu'on lui attribue souvent ».
[3] [Kostitzin, V. A., 1937], pp. 198-199.
[4] [Brillouin, L., 1959, 1988], p. 280.
[5] En 2002, Collot publiait encore régulièrement sa revue.
[6] Voir [Collot, F., 1991], pp. 291-293, [Collot, F., 1992], pp. 77-79 et [Collot, F., 1995], p. 197.
[7] [Collot, F., 1995], p. 197.

autoroutier…)[1]. C'est pourquoi, pour lui, et dans le sillage des idées de Teilhard de Chardin, il faut affirmer que « la complexification croissante des structures vivantes s'accompagne d'une diminution d'entropie » et non de son augmentation[2]. L'intérêt par rapport aux propositions de Henri Atlan qui suivront et qui seront aussi inspirées de la « théorie de l'information », est que la structure spatiale de l'organisme vivant est formalisée[3].

Avec Francis Collot, on a donc affaire à quelqu'un qui, hors institution et hors laboratoire, propose une théorie physicaliste générale de la morphogenèse voire de la phylogenèse. Ses articles sont peu lus et peu diffusés. Il s'entoure certes de quelques amis fidèles, pour l'essentiel mathématiciens et physiciens. Il se charge souvent d'envoyer ses articles lui-même aux auteurs qu'il lit dans les grandes revues. C'est donc un type de personnalité qui, par son parcours et par bien des traits, rappelle les destins des physiciens et médecins comme Emile Pinel (1906-1985)[4] ou Pierre Vendryès (1908-1989)[5] aux mêmes époques. Enfin, et par contraste, il rappelle aussi le destin du physico-chimiste Pierre Delattre sur lequel nous reviendrons. Ce dernier a en effet été de ceux qui ont plus tard présidé à la naissance, officielle et institutionnelle celle-là, de la biologie théorique en France.

Toutefois, l'approche de Collot commence à recevoir quelques échos au début des années 1970, notamment lors du premier colloque sur l'entropie organisé en 1971, à Royaumont, à l'occasion du 4ème Congrès International de Biologie Mathématique. Son « principe de minimisation de l'entropie » est rapproché du « principe de configuration optimale » de Rashevsky par un jeune québécois, né en 1940, Roger V. Jean, qui fait alors son doctorat de troisième cycle en mathématiques à Paris. Il soutiendra son doctorat d'Etat en mathématiques à l'Université Pierre et Marie Curie – Paris VI, en 1984. À son retour définitif au Québec, et après différents postes d'enseignement, il deviendra Professeur de mathématiques à l'Université de Québec à Rimouski (UQAR).

Roger Jean se caractérise par le fait qu'il étudie systématiquement toute la littérature sur la phyllotaxie comme ses livres en témoignent[6]. Il s'informe même assez précisément sur l'histoire de toutes les approches physiologiques et physico-chimiques de la phyllotaxie. Convaincu par les dernières idées de Rashevsky, fasciné par les travaux nombreux sur la présence des suites de Fibonacci dans la nature, il a pour ambition de construire une théorie unitaire de ce phénomène particulier qu'est la phyllotaxie. Dès ses premiers travaux, il essaie d'employer aussi de son côté la

---

[1] [Collot, F., 1995], p. 197.

[2] [Jean, R. V., 1978], p. 147. En 1978, le mathématicien Jean rappelle que, depuis quelques décennies, il devient pensable que les êtres vivants violent le second principe de la thermodynamique (d'augmentation de l'entropie) à partir du moment où l'on précise que ce sont des systèmes ouverts. Il s'appuie pour cela sur les travaux de Prigogine et de la thermodynamique des états dissipatifs (*ibid.*, p. 146). Mais en fait, avant qu'il connaisse les travaux sérieux et poussés de Prigogine et de son école, Collot avait de toute façon été convaincu par Teilhard de Chardin et son livre influent et populaire en France : *Le phénomène humain* (1955).

[3] Nous ne parlerons pas davantage ici du travail d'Atlan (*L'organisation biologique et la théorie de l'information,* 1972) puisqu'il n'a pas servi à clarifier les problèmes de formalisation de la forme et il n'en avait d'ailleurs pas l'intention. L'organisation biologique y est conçue en termes purement informationnels voire communicationnels, cognitifs et linguistiques.

[4] Voir son auto-biographie intellectuelle *in* [Pinel, E., 1981], pp. 14-15. Collot publiera plusieurs fois Pinel dans sa revue. Après l'avoir pratiquée, Pinel se prononça contre la statistique en médecine et pour une physique des champs unitaires appliquée au vivant.

[5] Voir le ton nettement bergsonien de [Vendryès, P., 1942], pp. 342-344. Le médecin et biophysicien (au sens de la médecine : par exemple, il contribua à instrumenter les sportifs de manière à suivre leur rythme cardiaque à distance) Vendryès se présente en faveur de la prise en compte de la probabilité objective dans le vivant et pour une mise en avant de la généralité des phénomènes aléatoires. L'idée est de répondre à Bergson que la physiologie nous dévoile un hasard créateur. Ainsi on évite le vitalisme de l'« élan vital », et on peut rester tout de même un chantre de la vie créatrice.

[6] Voir les bibliographies consistantes et quasi-exhaustives de [Jean, R. V., 1978], [Jean, R. V., 1983], [Jean, R. V., 1987] et [Jean, R. V., 1994, 1995].

notion d'entropie. C'est à l'occasion de recherches bibliographiques poussées qu'il a notamment connaissance du travail de Collot.

C'est en 1974 que Jean choisira son sujet de thèse de troisième cycle : « Matrices de croissance et entropie en phyllotaxie » (1977). Dans ce travail, il reprend à Rashevsky et Rosen l'idée d'une « biologie relationnelle » comme celle de « configuration optimale ». Mais les relations dont il parle ne seront plus de nature purement topologique puisque, comme Collot, il plonge ces structures de relations dans un espace probabilisable de manière à pouvoir définir une « bio-entropie » de croissance[1]. Ce qui a pour effet de re-concrétiser la biologie relationnelle et de l'asseoir sur une notion venant originellement de la physique, même si elle est entre-temps devenue très floue et à prétention interdisciplinaire. Jean se dit pourtant convaincu que Collot, au cours du colloque de Royaumont, a réussi à réconcilier physiciens, informaticiens, mathématiciens et biologistes autour de son « entropie généralisée ». Il s'en inspire donc pour son propre modèle. En 1978, Jean crée le terme de « phytomathématique » pour définir « l'approche mathématique du phénomène végétal »[2].

Par la suite, prenant ses distances avec sa première approche, Jean va donner un poids plus grand au mécanisme[3]. Rapidement, en effet, il est impressionné par les travaux tardifs du célèbre mathématicien et pédagogue marxiste américain Irving Adler qui sont publiés dans le *Journal of Theoretical Biology* à partir de 1974. Adler (né en 1913) vit alors à North Bennington, dans le Vermont. Et Jean peut aller le visiter aisément après son retour au Québec. Adler propose une théorie dite de la « pression de contact » pour expliquer la phyllotaxie. Les « contacts » d'une jeune feuille sont les feuilles déjà existantes contre lesquelles cette feuille est comprimée. Selon Adler, il faut considérer que « la pression de la croissance tend à maximiser la distance minimale entre les centres des feuilles »[4]. Il propose ainsi un « principe Maximin »[5]. Des relations de récurrence arithmétique peuvent ensuite être écrites à partir de ce principe qui ne vaut pourtant que pour une certaine catégorie de plantes à feuilles.

En poursuivant plutôt sur la lancée donc plus nettement physicaliste d'Adler, Jean modifie quelque peu sa formalisation initiale et il l'appellera « modèle systémique » en 1980[6]. Ce modèle permet de calculer de manière purement algébrique les types de spirales foliaires susceptibles d'exister. Jean ne recourt donc pas spécialement à l'ordinateur même s'il cite certains cas de simulations inspirés des approches dont nous avons parlé. Il conserve en ce sens une approche assez spéculative. Au sujet de la phyllotaxie proprement dite, sa conviction peut être résumée par ces propos : « la phyllotaxie est un phénomène épigénétique, holiste, systémique ; elle opère au-dessus de la chimie et de la physique »[7]. Jean ne se livre à aucune série d'expériences systématiques pour contrôler son modèle. Il se satisfait simplement de le voir « prédire les fréquences relatives d'apparition des différents arrangements »[8]. Cela lui suffit pour s'assurer qu'une bonne voie s'ouvre par là[9].

---

[1] [Jean, R. V., 1978], p. 216.
[2] C'est le titre de [Jean, R. V., 1978].
[3] Adler et Jean donneront une histoire personnelle des modèles de phyllotaxie dans [Adler, I., Barabe, D. et Jean, R. V., 1997].
[4] [Jean, R. J., 1983], p. 159.
[5] [Jean, R. J., 1983], p. 161.
[6] Voir [Jean, R. V., 1983], pp. 203-205.
[7] [Jean, R. V., 1983], p. 230.
[8] [Jean, R. V., 1983], p. 243.
[9] « Par le seul fait qu'elle permet l'utilisation du Principe de configuration optimale, nous croyons que notre approche a une justification et une fin en soi », [Jean, R. V., 1978], p. 223.

Reconnaissance de la dispersion des « modèles »

Par la suite, en 1994, Roger Jean présentera encore une autre version de son même modèle systémique[1], mais en insistant cette fois-ci sur le fait que le principe de « production minimale d'entropie » est à considérer comme un cas particulier du « principe de configuration optimale » de Rashevsky[2]. Cette dernière précision est précieuse pour nous. Elle indique combien la biologie théorique d'après-guerre, en l'espèce l'étude théorique de cette partie de la morphogenèse qu'est la phyllotaxie, excelle désormais à passer adroitement du mathématisme au physicalisme, et inversement, *via* la notion d'entropie.

Entre-temps, les frontières ont certes été brouillées par la physique théorique. Cette souplesse, cette réversibilité même, indique bien en tout cas que l'enjeu majeur n'est plus dans une *réduction* des phénomènes biologiques, qu'elle soit une réduction aux nombres ou à la matière, mais dans *une résistance à la dispersion* des modèles. Jean admet fort bien qu'il recherche seulement un modèle formel. Il admet donc sans problème le fait que ses mathématiques ne sont *pas enracinées* dans le phénomène réel. Mais il cherche tout de même à faire converger mathématiquement les différents modèles mathématiques qui existent[3]. À la fin de sa carrière, il travaillera ainsi à montrer que beaucoup de modèles physicalistes peuvent être réinterprétés, c'est-à-dire traduit mathématiquement, dans le formalisme de son propre principe d'entropie minimale : c'est cette unification mathématique, par les mathématiques, qu'il appellera une « convergence des modèles »[4].

Ainsi, comme on a vu auparavant le front des résistances au déracinement s'effriter, s'éroder, ou changer de stratégie, on voit ce front des résistances théoriques, ou théorétiques, à la diversité des modèles, tel l'Œdipe de Sophocle, devenir la victime de ce qu'il fuit de par l'effet même de sa fuite. Car tous ces chercheurs qui fuient la dispersion proposent des approches finalement assez différentes dans le détail, même si les principes d'optimalité sont presque toujours présents. Tout dépend de ce qu'ils veulent ou peuvent ainsi valoriser comme aspect de la plante au moyen du formalisme qu'ils sont tenus de choisir *a priori*. Il faut le dire tout net : cette résistance théorique se manifeste elle-même, à la longue, sous une forme dispersée et passablement cacophonique. Par là, à son corps défendant, elle rend dans les faits un peu plus les armes devant le modélisme perspectiviste, et cela même si elle invoque quasi-rituellement le principe selon lequel il faudrait davantage chercher à « expliquer » (et il ne devrait donc y avoir pour elle qu'une *seule* « explication ») plutôt qu'à « décrire ». Elle admet certes la relativité de la description mais non point celle de l'explication, même si cette explication ne dit pas par ailleurs le vrai fond des choses, de par son déracinement cette fois-ci assumé. Et c'est pour atteindre à l'unicité de l'explication que, par voie de conséquence, elle multiplie et diversifie ses tentatives d'explication. En ces matières, il est un personnage qui a contribué plus que d'autres à une certaine résistance face à la dispersion des modèles de morphogenèse comme face à la simulation. Il s'agit de René Thom.

---

[1] Il ne citera plus Collot à partir de ce moment-là.
[2] [Jean, R. V., 1994, 1995], p. 132.
[3] « La compilation de modèles isolés ne peut donner à la phytomathématique son statut de science. Nous recherchons des principes fondamentaux qui exprimeraient l'unité du monde végétal tout en permettant une mathématisation progressive », [Jean, R. V., 1978], p. 209.
[4] [Jean, R. V., 1994, 1995], pp. 185-203.

Une topologie de la morphogenèse en France : Thom et le modèle conçu comme paradigme du réel (1972)

Notre tableau des modèles théoriques et mathématistes/physicalistes de la morphogenèse ne serait pas complet en effet si nous n'y faisions paraître ce personnage dont les idées ont joué un rôle non négligeable dans la résistance aux simulations sur ordinateur en morphogenèse mais aussi et surtout dans l'émergence tardive de la biologie théorique en France. Ce rejet spécifique des modèles descriptifs et des simulations est au départ le fait d'un mathématicien pur : René Thom (1923-2002). Or, il est arrivé que son approche touche à des problématiques de morphogenèse végétale. De plus son épistémologie sera utilisée par la suite pour servir à légitimer une nouvelle forme de modélisation qualitative en botanique : il nous faut donc tâcher d'en saisir ici l'esprit.

Quelle est, en quelques mots, la conception du « modèle mathématique » propre à René Thom ? Pourquoi conduit-elle immanquablement à un mépris ou à une marginalisation de la simulation ? En quoi enfin cette stratégie d'hégémonie d'une certaine mathématique à prétention concrète rencontre-t-elle précisément une stratégie analogue en embryologie théorique ? Sans prétendre faire justice à la carrière de René Thom et à ses nombreux travaux[1], nous ne reviendrons ici que sur ces quelques points qui doivent plus spécifiquement éclairer notre enquête historique.

À la fin des années 1960, alors qu'il est professeur permanent à l'Institut des Hautes Etudes Scientifiques (IHES), à Bures-sur-Yvette, René Thom estime en effet pouvoir établir un pont entre les mathématiques pures et l'embryologie théorique. Avec la théorie mathématique des catastrophes à laquelle il a personnellement contribué et qui lui valut la médaille Fields en 1958, Thom s'est intéressé systématiquement et de façon générale à l'émergence de discontinuités à l'intérieur des milieux continus. Il développe ainsi une approche topologique fondée sur un point de vue continuiste, plus « concrète » en ce sens, et donc liée aux instruments de la géométrie différentielle. Avec ce qu'il considère comme de nouvelles mathématiques de la qualité, Thom privilégie les propriétés globales et structurelles des formes intervenant dans l'espace géométrique : inclusions, voisinages, similitudes de formes.

C'est à la fin des années 1960 que ses réflexions de topologie pure commencent à le laisser sur sa faim. Thom s'intéresse alors aux applications que ces mathématiques pourraient avoir et à la philosophie de la nature qu'elles pourraient impliquer. C'est à partir de ce moment-là qu'il propose de donner un cadre mathématique rigoureux et non calculatoire à l'embryologie et plus largement à toute morphogenèse du vivant. N'ignorant pas les travaux plus anciens de phyllotaxie, René Thom poursuit en fait plus spécifiquement les ouvertures systématiques proposées plus récemment par le mathématicien Hermann Weyl dans son ouvrage de 1952 : *Symmetry*[2]. Dans ce livre, Weyl montrait la généralité du principe de symétrie ou harmonie des proportions. Il tissait ainsi des liens inédits entre l'art, la nature organique et la nature inorganique[3] tout en faisant ainsi écho, après Képler, aux spéculations de Platon, dans le *Timée*, au sujet des solides primordiaux et des formes idéales. Impressionné par cette nouvelle présentation transdisciplinaire de l'économie des formes spatiales, Thom propose d'acclimater les descriptions

[1] Nous renvoyons pour cela à ses nombreuses publications ainsi qu'à celles de Jean Petitot. Voir également la présentation épistémologique de [Boutot, A., 1993].
[2] [Weyl, H., 1952, 1964].
[3] [Weyl, H., 1952, 1964], préface.

empiriques de la morphogenèse (la description des différents types de genèse d'organe) à ses propres mathématiques qualitatives.

Dès lors, René Thom s'enquiert plus précisément de l'état de l'embryologie de son temps. Et il s'informe essentiellement auprès des écrits de l'organiciste Waddington. Rappelons que, contre les prétentions réductionnistes de la biologie moléculaire et des explications de l'ontogenèse par le hasard, ce dernier prône une théorie mathématique de la biologie du développement. Depuis la fin des années 1930, Waddington est persuadé que l'approche par la génétique ne suffira pas et qu'il faut continuer à chercher l'explication des formes vivantes par un biais à la fois plus systématique et plus global, sans se livrer toutefois à un holisme qui ne serait qu'une plate résurgence du vitalisme. Le but de Waddington est donc déjà d'essayer de trouver une formalisation mathématique qui permette justement de faire l'économie d'une réification des champs morphogénétiques tout en donnant un poids fonctionnel à cette hypothèse. Le but de la mathématisation est donc pour lui de montrer que l'on peut tendre vers une approche organiciste sans se livrer pour autant à une nouvelle forme de vitalisme, c'est-à-dire sans hypostasier, sans rendre substantiel ce qui préside à la morphogenèse de l'individu. À terme, il s'agit pour lui de chercher « à posséder un corps de théorie comparable aux théories physiques majeures, telles que la thermodynamique, la relativité générale, la mécanique ondulatoire »[1].

Pour assurer ce rôle argumentatif, selon Thom, la notion de « champ morphogénétique », introduite précédemment par Waddington en 1957, doit être explicitée en ces termes topologiques qu'il pratique justement pour lui-même dans sa théorie des catastrophes. Ainsi ce serait des « êtres géométriques » qui commanderaient la réalisation biochimique des êtres vivants et non l'inverse[2]. Mais il s'agit surtout pour Thom de produire un manifeste. Dans son ouvrage principal, *Stabilité structurelle et morphogenèse,* il avoue qu'il recherche, de façon générale, à disqualifier l'approche constructiviste par le détail en science pour favoriser l'approche par le global. Il veut favoriser un « vitalisme géométrique » et contrer le réductionnisme[3], trop répandu selon lui dans les sciences de la nature. Selon Thom, qui emboîte ici le pas à Waddington, il ne faut pas attendre que les biochimistes nous fournissent une « explication ultime de la nature des phénomènes vitaux », mais plutôt s'attaquer à ces phénomènes en procédant du « haut vers le bas », c'est-à-dire en expliquant la biochimie par la morphogenèse[4]. Et pour cela il faut partir des seules propriétés topologiques de la structure quadri-dimensionnelle : l'espace et le temps. Or, c'est là que Thom met en valeur sa démonstration purement mathématique selon laquelle il n'existe, dans un tel espace, que sept types de discontinuités fondamentales. Et c'est de cette considération, centrale dans son travail, qu'il va ensuite tirer sa conception particulière du « modèle mathématique ». Prôner un « vitalisme géométrique », c'est la seule issue, selon lui, dans la mesure où l'on ne veut pas avoir à spécifier sous la forme d'un être substantiel et concret (c'est-à-dire manifesté *hic et nunc* en un substrat précis) ce qui commande la mise en forme des vivants. Un idéal à l'œuvre dans le concret mais non manifesté concrètement, telle doit donc être la nature d'une stabilité structurelle qui, de ce fait, vaut généralement pour tout substrat.

Pour lui, qui suit en cela Waddington, il ne peut y avoir de modèle mathématique du vivant que si l'on y fait intervenir une approche spatio-temporelle, c'est-à-dire une approche essentiellement dynamique et spatialisée. Là est une des clés de la différence entre Rashevsky et

[1] [Waddington, C. H., 1962], p. 45.
[2] [Thom, R., 1972, 1977], p. 151.
[3] [Thom, R., 1972, 1977], p. 158.
[4] [Thom, R., 1972, 1977], p. 155 : « on peut d'ailleurs se demander d'ores et déjà si, au lieu d'expliquer la Morphogenèse par la Biochimie, ce n'est pas l'attitude inverse qu'il convient de prendre ».

Thom, et qui fait que l'on peut indifféremment concevoir sa vision comme un physicalisme ou comme un mathématisme. La biologie moléculaire lui semble en effet travailler à occulter cette *spatialité* des organismes vivants. Thom peut en effet affirmer : « Tout l'aspect géométrique et spatial des réactions biochimiques échappe de ce fait à la Biochimie …»[1] Mais si l'on fait l'hypothèse d'un réel toujours assimilable à un espace géométrique continu, certains résultats sur la limite du nombre de structures topologiques qui peuvent l'affecter et sur leur engendrement réciproque peuvent dès lors être démontrés *a priori* : c'est bien là rejoindre une préoccupation de Waddington sur les canalisations des successions de formes dans le développement ontogénétique.

C'est donc par pur choix philosophique que Thom préconise l'emploi de ce qu'il appelle les « modèles continus »[2]. À l'inverse, les « modèles formels », c'est-à-dire les modèles mettant en œuvre un système formel (un nombre fini d'états et des règles de transition) et donc une discrétisation de l'espace, ne sont pas, selon lui, à même de décrire des ruptures de symétrie. Certaines questions peuvent d'ailleurs y être parfois indécidables, eu égard au théorème de Gödel[3]. C'est pour toutes ces raisons qu'il faut selon lui ne pas tout attendre de ces modèles formels. L'enjeu majeur de cette préférence pour la représentation continuiste est donc bien d'ordre plus philosophique que réellement technique : il réside dans ce que Thom appelle le déterminisme scientifique. Un modèle doit ainsi nous permettre de *voir la cause profonde et première* des phénomènes :

*« Les théorèmes d'existence et d'unicité des solutions d'un système différentiel à coefficients différentiables fournissent alors le schéma sans doute le plus parfait de déterminisme scientifique. La possibilité d'utiliser le modèle différentiel est, à mes yeux, la justification ultime de l'emploi de modèles quantitatifs dans les sciences. Ce point mérite sans doute quelque justification ; l'essentiel de la méthode préconisée dans cet ouvrage [*Stabilité structurelle et morphogenèse*] consiste à admettre a priori l'existence d'un modèle différentiel sous-jacent au processus étudié et, faute de connaître explicitement ce modèle, à déduire de la seule supposition de son existence des conclusions relatives à la nature de la singularité des processus.* »[4]

On remarque que ces exigences font que Thom considère en fait le modèle comme une norme ou une idéalité à l'œuvre au cœur de la réalité. Le mot modèle est donc bien pris ici comme synonyme d'archétype. Même s'il semble vouloir l'exprimer parfois[5], la neutralité ontologique[6] de Thom est, en ce sens, très contestable. Faire l'hypothèse que l'on aura *toujours* raison d'utiliser l'hypothèse des « modèles continus » même si l'on affirme en même temps qu'on ne les suppose pas pour cela sous-jacents à la réalité mais seulement « sus-jacents », c'est-à-dire seulement

[1] [Thom, R., 1972, 1977], p. 154.
[2] [Thom, R., 1972, 1977], pp. 2-8.
[3] [Thom, R., 1972, 1977], p. 21.
[4] [Thom, R., 1972, 1977], p. 4.
[5] [Thom, R., 1972, 1977], p. 7. Dans cette page en fait particulièrement ambiguë, Thom mélange de façon symptomatique le problème de la localité des modèles avec celui de leur conformité au réel. Il en ressort que tout ce qui sera de toute façon observable et par suite modélisable en un langage mathématique le sera en termes de modèles locaux continus. Il s'agit donc bien d'un mathématisme ontologique, l'être reposant ici en dernière analyse sur ce que l'on en sait et dit, c'est-à-dire, comme souvent dans les philosophies du vingtième siècle, sur le langage. Selon nous, il s'agit donc indifféremment d'un *linguisticisme mathématiste* (ou *structuralisme* selon la légère correction et adaptation de Petitot reprise par Boutot) ou d'une *ontologie mathématiste* doublée si l'on veut d'une *vision linguistique* de l'être et par déduction de tout ce qui y participe, c'est-à-dire tous les types de « substrats » *a priori* : d'où s'ensuit une morphologie générale effectivement fondée sur une ontologie.
[6] Selon [Boutot, A., 1993], p. 83.

projetés au-dessus d'elle, le résultat est le même quand on identifie de surcroît l'être à ce que l'on peut en observer et en dire dans un langage structuré, à notre échelle, et de façon toujours « sus-jacente » justement[1], comme le fait Thom par ailleurs. Le réel, ou notre accession au réel (peu importe la distinction ici puisque Thom part du principe que justement on ne peut la faire), étant supposé structurable comme un langage, en affirmer de surcroît comme toujours possible la mathématisation sous une forme topologique et continuiste, c'est bien au final exprimer une ontologie mathématiste ou physicaliste abstraite bien particulière et donc préférentielle.

Il se trouve qu'un tel sens du mot « modèle » n'est pas souvent assumé dans la communauté scientifique. Cette signification ne semble pas réellement correspondre à l'activité de la recherche scientifique contemporaine du texte de Thom[2]. Malgré ce mot de « modèle », le concept que Thom veut désigner par là s'apparente en effet bien davantage au « principe théorique » et mathématique que Rashevsky recherche pour sa part depuis les années 1930. Le parallélisme est d'autant plus saisissant si l'on se souvient que, dès 1954, comme nous l'avons montré, Rashevsky et ses élèves ont à maintes reprises, et bien avant Thom, prôné le recours à la topologie, dans son versant algébrique il est vrai. On comprend d'ailleurs que, par contraste avec cette topologie plus abstraite, la topologie différentielle de Thom, apparemment fondée sur l'intuition du continu, a pu rassembler plus de suffrages parce qu'elle a pu sembler en effet plus réaliste et donc plus fédératrice que le projet tardif de l'école rashevskyenne, même si l'option épistémologique sous-jacente est pourtant fondamentalement similaire. Rashevsky propose une topologie de l'organisation des *propriétés fonctionnelles* au sens biologique, alors que Thom, comme Rosen, semble proposer une topologie des *formes matérielles* directement observables en tout type de substrat. Thom rencontre plus de succès que Rosen à ce moment-là car il réussit à rallier le combat de l'embryologie théorique ainsi que la réaction montante, interne à la biologie, contre l'hégémonie de la biologie moléculaire, notamment en botanique.

La leçon à tirer de ce constat pour l'histoire des formalismes en science nous semble très importante ici : on constate une fois de plus que, de même que le recours à un même formalisme n'engage pas nécessairement des scientifiques différents à adopter la même ontologie, symétriquement, derrière des modifications ou des glissements internes aux formalismes, il n'y a pas forcément de modifications épistémologiques ou ontologiques majeures qui les accompagneraient. Thom, en ce sens, n'innove pas fondamentalement dans ses options philosophiques et épistémologiques par rapport au dernier Rashevsky et à sa vision mathématiste ou physicaliste abstraite des principes du vivant.

Quoi qu'il en soit, à l'heure où s'exprime Thom, cette place de choix accordée aux modèles continus et différentiables a tout de même déjà été ébranlée par les mathématiciens informaticiens comme Murray Eden ou Stanislaw Ulam, ainsi que nous l'avons vu. Si bien que la tentative de Thom se présente essentiellement comme un manifeste critique et philosophique à l'égard d'une pratique du modèle de simulation en germe mais déjà irrévocablement en expansion : il faut donc comprendre ces spéculations comme une réaction à une tendance croissante de la recherche en morphogenèse. Cette réaction que l'on pourrait dire tout aussi bien « mathématiste » que « physicaliste » se confirmera d'ailleurs dans le titre délibérément combatif d'un ouvrage de Thom

[1] Voir [Boutot, A., 1993], p. 74 : « Thom projette *au-dessus* de l'espace substrat des morphologies un espace idéal paramétrisant l'état, c'est-à-dire les propriétés qualitatives du substrat en chacun de ses points. » C'est l'auteur qui souligne.

[2] Voir l'article critique de la biologiste Françoise Gaill *in* [Petitot, J., 1988], pp. 269-279. Elle y trace un bilan et elle étudie le malentendu initial, qui persistera encore dans les années 1980, entre les biologistes et la théorie des catastrophes. Selon elle, Thom propose une biologie théorique, au sens de la physique théorique, alors que les biologistes cherchent au mieux des théories biologiques.

paru en 1991 : *Prédire n'est pas expliquer*[1]. Autrement dit, sentir, voir qualitativement et dans un milieu continu, permettrait d'expliquer, alors que discrétiser permettrait seulement de dire, de prédire pour agir. C'est donc bien là disqualifier grandement le recours à l'ordinateur, en plus de la biologie moléculaire, dans les sciences du vivant, que ce soit pour des modèles continus ou des modèles discrets.

De fait, ces spéculations qui sont plutôt d'ordre philosophique, ne donnent guère de véritables moyens mathématiques aux naturalistes. La modélisation des botanistes, par exemple, qui exige au moins d'être quantifiée pour être vérifiée sur le terrain ne semble pas pouvoir s'accommoder facilement de cette approche valable seulement dans les grandes lignes. En outre, et contre toute attente, Thom semble ouvertement désespérer de la modélisation mathématique (au sens où il l'entend) en morphogenèse végétale et en phyllotaxie, en particulier, alors que l'embryologie animale lui semble plus accessible. C'est que, dit-il, « chez les végétaux […], on ne peut parler d'homéomorphisme qu'entre organes pris isolément, tels que feuille, tige, racine etc., mais il n'existe en principe aucun isomorphisme global entre deux organismes »[2]. L'individu végétal, dans sa structure morphologique, est en effet très *hétérogène à lui-même* aussi bien dans le temps que dans l'espace. C'est ce qui en rend la reconstruction mathématique très difficile voire impossible pour Thom. Autrement dit, selon ces propos de 1972, on peut désespérer de jamais trouver un modèle de déformation continue pour expliquer la morphogenèse d'une plante : les ruptures qualitatives intervenant dans l'ontogenèse végétale sont telles, pour Thom, qu'il semble y avoir peu de moyen d'y voir un modèle mathématique continu à l'œuvre.

Au début des années 1970 donc, si Thom est cité en biologie, et spécifiquement en botanique, il y est le plus souvent invoqué au niveau rhétorique, à savoir contre le réductionnisme moléculaire en général, plutôt qu'il n'est réellement utilisé et appliqué. Il ne rencontre d'ailleurs qu'un enthousiasme mitigé chez l'embryologiste Waddington lui-même sur les notions duquel il s'appuie pourtant. Ce dernier l'accuse[3] en effet de ne pas bien maîtriser les concepts biologiques et de pratiquer ainsi des généralisations et des confusions abusives, même s'il reconnaît que les mathématiques de Thom ont à enseigner quelque chose à la biologie du fait qu'elles se sont « développées en relation avec un aspect défini de la réalité »[4], c'est-à-dire qu'elles possèdent justement une assise concrète indéniable de par une attention au *continuum* physique. Par la suite les biologistes du développement, s'ils le citent parfois avec révérence[5] n'utiliseront guère cette approche qui se présente elle-même comme infalsifiable et spéculative. Thom lui-même avoue en effet :

« On pourrait raisonnablement exiger d'une théorie de la morphogenèse qu'elle décrive explicitement en chaque point la cause locale du processus morphogénétique. Les modèles que nous offrirons ne peuvent, en principe, satisfaire à cette demande […] Aussi n'en faut-il pas attendre, pour le moment, plus qu'une construction conceptuelle d'un intérêt essentiellement spéculatif. »[6]

---

[1] [Thom, R., Noël, E., 1991], p*assim*.
[2] [Thom, R., 1972, 1977], p. 152.
[3] [Thom, R., 1972, 1977], p. XIV.
[4] Extrait de la préface de Waddington à l'édition anglaise de *Stabilité structurelle et morphogenèse*, [Thom, R., 1972, 1977], p. XII.
[5] Voir par exemple [Bouchon, J.,1995], p.16.
[6] [Thom, R., 1972, 1977], p. 161.

Nous aurons cependant bientôt l'occasion de voir que, par une nouvelle ironie de l'histoire des idées et des sciences, certains botanistes (ni quantitativistes ni mathématiciens) vont assez vite arguer des considérations générales de Thom, non au sujet des modèles continus il est vrai mais surtout au sujet de la diversité des niveaux d'intégration et de stabilité dans le monde organique, pour construire leur propre concept de « modèle », « architectural » et qualitatif celui-ci, donc pas du tout « mathématique » mais plutôt symbolique et graphique. Nous reviendrons sur cet héritage paradoxal en temps utile[1]. Mais auparavant, nous pouvons former un bilan sur l'état des résistances à la dispersion des modèles et des simulations à la fin des années 1960 et au début des années 1970.

Bilan sur la biophysique, la biologie mathématique et la phyllotaxie théoriques devant l'ordinateur

En résumé, à partir des années 1960 et dans un contexte d'abord essentiellement américain, les approches traditionnelles émanant de la biophysique et de la biologie théoriques, face aux réussites de la biologie moléculaire[2], mais aussi face à l'émergence de l'ordinateur et aux concepts transversaux de la théorie de l'information, finissent par admettre la pertinence de la notion de modèle mathématique, d'une part sous l'effet de la concurrence des *modèles de la cybernétique* et, d'autre part, sous l'impulsion des développements et des spéculations mathématiques internes, donc théoriques, directement dues à l'émergence du *concept* d'automate formel, chez Rosen, en particulier. C'est donc tout autant comme alternative technique et instrumentale qu'au titre de proposition formelle que l'émergence de l'ordinateur a incité la biologie théorique à ce déplacement et à cette reconnaissance d'une nouvelle pratique.

De son côté, à la même époque, la biologie théorique française n'existe quasiment pas, en tout cas de manière institutionnelle. Mais, là où elle existe, sa résistance à la dispersion est d'une nature semblable. Le terme de « modèle » est là aussi finalement assumé. Mais il est récupéré et sa signification se voit déplacée vers un idéal platonisant. La motivation des résistances françaises qui sont le plus franchement physicalistes est d'ailleurs bien souvent de nature vitaliste ou spiritualiste, notamment de par les fortes influences de Bergson et de Teilhard de Chardin, avérées jusque dans les années 1960. Autre particularité de ce front de résistance français : sa réaction aux principes des simulations est plus tardive. L'omniprésence de l'ordinateur ne la concerne pas avant un certain temps, au contraire de ce qui se passe aux Etats-Unis. Les laboratoires français sont d'ailleurs souvent encore dans une phase de reconstruction[3]. Pendant longtemps, ils sont très peu pourvus en ordinateurs[4]. Ils les intègrent plus ou moins dans leurs approches, mais pour certains avec retard. Ils déploient ainsi à leur façon cette nouvelle méthode, avec les quelques déplacements épistémologiques particuliers qui l'accompagnent. Comme on peut déjà le comprendre, le rôle de l'ordinateur s'y fait moins rapidement et moins directement

[1] Il s'agira de Hallé et Oldeman. Voir *infra.*

[2] Cette idée est relativement consensuelle chez les historiens de la biologie théorique. Voir, par exemple, [Keller, E. F., 2002, 2003], p. 6. Nous la trouvons incidemment confirmée par nos travaux. Mais on en a trop souvent conclu à la disparition de la biologie théorique. Ce qui serait le cas si la biologie théorique n'était justement caractérisée parfois, notamment dans sa forme rashevskyenne, par une grande capacité à varier ses formalismes et donc à se muer chez certains, au contact avec l'ordinateur, en une biologie formelle voire informationnelle et qui, elle, est persistante.

[3] Sur la reconstruction de la recherche française et notamment du CNRS dans l'après-guerre, voir [Picard, J.-F., 1989].

[4] Notamment à cause d'une querelle sur le principe même de la machine à calculer automatique amplifiée par la personnalité du cybernéticien Louis Couffignal. Dans ses travaux, Girolamo Ramunni a ainsi bien mis en évidence les raisons de la non-construction de l'ordinateur français dans les années 1950 et le retard conséquent pris par l'instrumentation scientifique française dans ce domaine au cours des années 1960. Voir [Ramunni, G., 1989c].

sentir, notamment, et cela peut sembler au premier abord plus surprenant, moins au niveau de l'adoption de l'ordinateur comme outil de calcul qu'au niveau de l'adoption des formalismes des automates pour l'expression des modèles : la modélisation mathématique française sera en ce domaine plus frileuse que sa consœur américaine. Alors même que, faute d'ordinateur français, des ordinateurs américains seront finalement achetés assez vite par la recherche française, ils seront davantage utilisés comme instruments de calcul, notamment statistique, que comme modèles de conception pour les formalismes eux-mêmes.

Cette première constatation ne suffit pourtant pas à elle seule à expliquer l'orientation particulière de la modélisation mathématique française dans la biologie d'après-guerre. On peut certes invoquer également la rareté des doubles formations en biologie et mathématique ou physique. Ce qui serait incriminer une fois de plus la forte étanchéité qui règne traditionnellement entre disciplines en France, sur le modèle du découpage comtien. Ces deux caractéristiques contribuent certes à dessiner une école française de modélisation mathématique pourvue d'une originalité propre. Mais, à bien regarder les documents, il y intervient en fait tout autant de raisons clairement politiques voire philosophiques. Ce sont ces raisons moins obvies qu'il est plus difficile de discerner *a priori* dans l'entrelacs des arguments scientifiques, techniques et sociaux et qui nécessitent que l'on retrace leur mode d'insertion dans la pratique de modélisation sur le terrain, cette fois-ci. Cela se révèlera essentiel pour notre enquête. Car c'est par rapport à ce contexte singulier, et d'une certaine façon en dépit de lui, que la pratique de la simulation sur ordinateur réaliste et détaillée des plantes se mettra en place dans les années 1970-1980 au CIRAD. Il nous faut donc brosser dès maintenant un tableau plus particulier de cette conception française de la modélisation mathématique en biologie et en agronomie afin de comprendre ce que les chercheurs et ingénieurs du CIRAD ont repris, infléchi ou même refusé dans cette conception.

Nous verrons que dans cette modélisation mathématique pour la biologie, qui s'est d'emblée présentée comme pragmatique (puisque la biologie théorique n'aura pas même d'institution avant 1981), la dispersion a été en revanche très vite reconnue. Cette diversité et cette dispersion ont même été revendiquées. Or, cette revendication est porteuse de sens en elle-même. Nous verrons qu'elle fait partie des indices qui incontestablement témoignent de la présence d'une option épistémologique contingente, fortement marquée philosophiquement et politiquement, dans cette France d'après-guerre.

CHAPITRE 15 – La dispersion pragmatique assumée : l'école de modélisation française et la morphogenèse

Nous n'allons pas bien sûr présenter ici tout le contexte français de la modélisation mathématique en biologie à la fin des années 1960, même si ce travail serait sans doute très instructif et profitable. Notre regard restera à terme toujours orienté vers le cas plus particulier de la modélisation de la forme des plantes. Mais, nous allons évoquer tout de même les caractères généraux d'un personnage emblématique des développements de la modélisation dans la France d'après-guerre, ceux de Jean-Marie Legay. Outre le fait qu'il a joué un rôle central dans la promotion de la modélisation mathématique, il se trouve de surcroît qu'une partie de ses recherches a porté sur la modélisation de la croissance des formes ramifiées et des plantes. C'est donc à ce double titre qu'il intéresse notre enquête. Précisons en outre que nous évoquons cette figure nationale dès maintenant, c'est-à-dire après avoir présenté et réfléchi sur la dernière formulation des travaux et de l'épistémologie de Rashevsky et de ses collaborateurs comme de certains de ses disciples, parce que le travail de Legay, dans le cas précis de la modélisation de la croissance des plantes, doit être interprété comme une reprise critique de l'approche du biophysicien américain par un modélisateur davantage habitué, car initialement formé dans cet esprit, à manipuler l'outil statistique. À l'occasion de divers colloques et de quelques visites, Legay a de surcroît personnellement connu et fréquenté Rashevsky. Mais, du fait de sa pratique expérimentale comme du fait de sa position philosophique singulière, Legay sera rapidement amené à infléchir cette épistémologie biophysique des modèles mathématiques. Car, pour l'expérimentateur qu'il est, les productions spéculatives de Rashevsky seront autant d'outils pour interpréter l'expérience mais non pour se faire une image théorique de la nature. Elevé au départ dans la tradition de recherche de lois quantitatives à la manière de Teissier, Legay hérite en effet aussi et surtout très fortement de la biométrie anglo-saxonne et des méthodes de la génétique comme des pratiques agronomiques de sélection sur le terrain. Mais, par là, comme Teissier lui-même, il hérite également, et dans la continuité de l'esprit de Claude Bernard, d'une forte attention au niveau plutôt physiologique que physique des phénomènes vivants. Enfin, par sa fréquentation de certains chercheurs d'Europe de l'Est particulièrement impliqués dans la cybernétique, il aura l'occasion de prendre contact avec ce que nous avons appelé le deuxième lieu de naissance de la pratique des modèles mathématiques : la théorie des rétro-contrôles et la théorie de l'information.

À la fin des années 1960 donc, plus qu'un autre, Legay se trouve à la croisée des trois significations séminales de la modélisation mathématique en biologie : la signification statistique et informationnelle, la signification théorique des biophysiciens et la signification cybernétique axée sur les boucles de rétro-contrôle et sur la notion de système. Cela l'amènera à produire une conception toute particulière de la modélisation mathématique. Or, nous montrerons qu'une telle conception, construite par lui de façon informée, consensuelle et subtile, présentera tout de même par la suite l'inconvénient de ne pas favoriser, en France, l'émergence d'une culture de la simulation informatique dans la biologie ou l'agronomie. C'est qu'il n'y aura de fusion possible pour ces trois traditions que dans la mesure où premièrement le modèle mathématique se verra confirmer son caractère abstractif et condensant et où, deuxièmement, et là prendra sa source l'originalité française de l'épistémologie des modèles, sera fortement niée sa qualité de

représentation. Le modèle, conçu dès le départ comme une abstraction perspectiviste, vaudra en acte, pragmatiquement, pour un objectif donné et bien circonscrit. Il n'y aura pas à imaginer de modèle général pour une situation biologique quelle qu'elle soit. Seuls des modèles particuliers adaptés à une situation, à un objectif et à des données précises seront considérés comme valables.

De façon significative et compréhensible pour nous *a posteriori,* c'est Legay qui sera parmi les premiers à inciter la recherche française d'après-guerre à rattraper son retard en modélisation mathématique. Mais il choisira de le faire en fusionnant en quelque sorte ces différentes approches du fait de sa propre pratique et eu égard à sa perspective d'expérimentateur. Il aura ensuite l'occasion de diffuser sa position dans ses enseignements d'universitaire mais aussi dans ses différents manifestes grâce auxquels il popularisera, en France, l'expression de « méthode des modèles ». Car, dans les années 1970 et 1980, c'est encore lui qui sera appelé, en première ligne, à faire la promotion de la modélisation mathématique auprès des chercheurs et ingénieurs français en sciences de la vie et de l'environnement. Mais interrogeons-nous donc d'abord sur les motivations et les modalités de ce croisement peu commun.

De la génétique à l'agronomie – 1947-1950

Un certain nombre de publications existent déjà sur le parcours universitaire et la carrière de Jean-Marie Legay[1]. Nous ne rappellerons ou préciserons ici que les points essentiels de sa biographie qui, selon nous, permettent d'expliquer et de mettre en perspective la naissance de sa conception originale de la modélisation ainsi que le rôle qu'ont pu y jouer ses propres tentatives de modélisation de la croissance des organes et des plantes. Comme on peut le comprendre, nous ne rendrons donc pas prioritairement justice à ses apports en ce qui concerne les connaissances plus proprement biologiques, notamment dans la physiologie et la morphogenèse du ver à soie, ni non plus dans les problématiques de modélisation en dynamique des populations.

Jean-Marie Legay naît à Lyon le 9 août 1925, dans une famille « attachée au plus large humanisme »[2] ainsi qu'il aimera à la qualifier plus tard. Il a donc exactement vingt ans le jour où la bombe atomique « Fat Man » est lancée sur Nagasaki[3]. Ce « cadeau d'anniversaire »[4] représentera pour lui quelque chose de décisif à un double titre : sa confirmation dans son choix pour une carrière de chercheur en sciences, et en particulier en sciences de la vie, ainsi que sa confirmation dans sa sensibilité politique déjà formée et son attachement à construire la paix pour que rien de tel que le fascisme ne se reproduise mais que rien non plus de si terrifiant que la bombe atomique, produit par excellence de la science, soit employé de nouveau[5]. Il se prépare alors à des études d'ingénieur agronome. En parallèle, il a déjà commencé à faire son apprentissage politique auprès des communistes. En 1947, il est ingénieur agronome de l'INA

[1] Voir la préface d'Etienne Landais *in* [Legay, J.-M., 1997], pp. 3-8. Voir également l'entretien avec la philosophe Anne-Françoise Schmid publié dans la revue *Natures, Sciences, Sociétés in* [Legay, J.-M. et Schmid, A. F., 2002]. Afin de compléter notre information, nous avons nous-mêmes rencontré Jean-Marie Legay lors d'un entretien de 2h30 et qui a donné lieu à une transcription. Voir [Legay, J.-M. et Varenne, F., 2001].
[2] [Legay, J.-M., 1981], p. 8.
[3] [Legay, J.-M., 1981], p. 7.
[4] [Legay, J.-M., 1981], p. 7.
[5] Il nous paraît instructif de rappeler ici que le jeune et futur philosophe Michel Serres se fait une réflexion très similaire quasiment à la même époque et devant le même événement. Voir [Latour, B. et Serres, M., 1992, 1994], p. 29. Il en concevra une philosophie de la science en apparence bien différente de celle de Legay mais en fait pleine du même esprit de conciliation, de solidarité, de circulation et d'absence de cloisonnements et de hiérarchies entre les savoirs. Pour dire les choses succinctement, l'un comme l'autre témoigne d'un esprit du temps *relationnel*, *circulationnel*, finalement assez bien défini. Voir notre annexe B.

(Institut National d'Agronomie) mais également diplômé de l'Institut de Statistique de Paris[1]. Les temps sont particulièrement durs pour une recherche française en pleine reconstruction. Les postes manquent. Legay commence sa carrière modestement, avec un stage de quelques mois pendant lequel il est sélectionneur de blé dur à Ariana en Tunisie. Il devient ensuite assistant stagiaire de génétique pendant un an auprès de l'INA. Titulaire d'une spécialisation en génétique végétale, il applique donc là les méthodes statistiques de la sélection génétique. À l'ISUP, Legay a notamment suivi les cours du statisticien Vessereau à une époque particulièrement fondatrice. D'un point de vue éditorial, en effet, il faut noter que 1947 est une année très faste pour l'introduction des méthodes de la statistique en France. C'est effectivement en cette même année 1947 qu'André Vessereau publie coup sur coup ses deux ouvrages classiques sur la statistique. Le principal, *Méthodes statistiques en biologie et en agronomie*, constituera un événement majeur dans les milieux de l'agriculture et de l'agronomie : il est le premier manuel complet et en langue française sur ce sujet. Il sera d'ailleurs cité[2] et utilisé régulièrement comme ouvrage de base et ce pendant plusieurs décennies[3]. La même année, Vessereau publie également *La statistique*, un ouvrage d'initiation à la statistique en général, dans la collection *Que sais-je ?* des Presses Universitaires de France[4]. Legay bénéficie donc par là d'une initiation pédagogique de qualité comme d'une formation aux méthodes statistiques de la génétique et de la biométrie anglo-saxonnes. Vessereau présente en détail la conception des plans d'expérience et des méthodes d'analyse de variance, au sens de R. A. Fisher, et ce dans une visée plus spécifiquement opérationnelle, car située dans un cadre agricole et agronomique, plus que ce n'était le cas dans l'usage davantage biologique et théorique qu'en faisait Teissier avant la guerre. Enfin, en 1947 également, l'ouvrage général et de synthèse de Fisher lui-même est enfin traduit en français : *Les méthodes statistiques adaptées à la méthode scientifique*[5].

Après la guerre, l'INRA est créé par la loi du 18 mai 1946. Legay souhaite vivement y être chercheur. Mais il ne trouve pas tout de suite la possibilité d'entrer dans cet institut. Dans ces années-là, en effet, l'INRA n'ouvre que très peu de postes. Il n'y a, en l'occurrence, aucun poste en génétique végétale. Finalement, en 1948, Legay parvient tout de même à entrer à l'INRA mais dans le département de zoologie… N'étant toujours pas titulaire d'un concours, il est d'abord soutenu temporairement par l'INRA : pour deux ans, il y devient ouvrier agricole à la station de sériciculture d'Alès (culture du ver à soie), station qui avait été conservée un peu par respect de la tradition depuis que Louis Pasteur y avait fait des travaux importants sur cet insecte. En 1950,

[1] C'est donc à l'époque où officient Georges Darmois (1888-1960), Georges T. Guilbaud (né en 1912) et surtout André Vesserau (né en 1907). Fréchet enseigne la statistique mathématique. Guilbaud se charge du côté applicatif en économie et science humaines. André Vessereau, polytechnicien, ingénieur des Manufactures de l'Etat, enseigne pour sa part l'application des méthodes statistiques à la biologie et à l'agriculture. On peut le considérer comme l'introducteur principal de ces méthodes en France. Bernard Bru confirme cette impression dans un entretien publié dans *Gérer et Comprendre*, [Bru, B., Colasse, B. et Pavé, F., 2002], p. 77.

[2] Par exemple, sous la plume du biométricien français Richard Tomassone, *in* [Tomassone, R. et Legay, J.-M., 1999], p. 41.

[3] Ce manuel de méthodes de près de 500 pages sera réédité et augmenté trois fois, jusqu'en 1988. En 1947 paraît également chez Masson un petit d'ouvrage d'Eugène Morice (né en 1897) : *Méthodes statistiques en médecine et en biologie*. Mais il n'aura pas autant de succès car il est moins complet et il se limite aux applications essentiellement médicales et biométriques de la statistique sans insister sur la méthode fishérienne des plans d'expérience. Morice est au départ un licencié en mathématique. Il est diplômé de l'ISUP en 1939. Il dirigera l'école d'application de l'INSEE à sa création en 1946. Voir sur ce point [Bru, B., Colasse, B. et Pavé, F., 2002], p. 84. Daniel Dugué (1912-1987, ENS 1930) qui enseigne également à l'ISUP, publiera seulement en 1958 son *Traité de statistique théorique et appliquée* chez Masson. Pour sa thèse de mathématiques de 1937, il avait travaillé directement avec Fisher puis avec Darmois mais sur des questions essentiellement théoriques concernant des problèmes d'estimation de paramètres dans les modèles probabilistes.

[4] Cet ouvrage connaîtra vingt-et-une éditions (mises à jour périodiquement), jusqu'en 2002...

[5] Cet ouvrage de Fisher remontait déjà à 1925 : *Statistical Methods for Research Works*. Il paraît aux PUF dans une traduction de I. Bertrand.

Legay est enfin reçu premier à un concours d'entrée dans le département de zoologie, au titre d'assistant de recherche. Il reste dans le domaine de la culture du ver à soie et travaille dans cette même station d'Alès. Au départ, ce choix d'orientation tient essentiellement au fait qu'il n'est pas nécessaire à l'INRA de mettre en place un nouveau laboratoire. Legay y prend alors en charge des activités de sélection génétique et d'amélioration du ver à soie. C'est là qu'il prend goût à l'étude de cet insecte domestique. Le cas du ver à soie est en effet très particulier. À son sujet, comme Legay le rappellera souvent[1], des générations d'hommes ont recueilli un savoir-faire, tout comme un certain savoir. Ce savoir s'est accumulé pendant des siècles, si ce n'est des millénaires, puisque les archéologues font remonter les premières activités de sériciculture en Chine à 5 ou 6000 ans avant Jésus-Christ[2]. Dans la décennie de 1950, le rôle de Jean-Marie Legay à l'INRA consiste à reprendre patiemment ces différents savoir-faire, à les éprouver expérimentalement et à les rendre plus rigoureux en les soumettant à des procédures de test statistique du type de ceux que Fisher et Vessereau préconisaient.

Il est intéressant de noter que Legay rencontre là pour la première fois la notion de « modèle mathématique »[3], précisément dans ce contexte agronomique et statistique où il faut, non pas découvrir des régularités dans la complexité du monde vivant, mais seulement vérifier certaines idées préexistantes au sujet de certaines régularités et leur donner une rigueur au moyen d'une mathématisation et d'une quantification de leur crédibilité. Dans des problématiques semblables, il faut noter que Vessereau lui-même limite l'emploi de l'expression de « modèle mathématique » à la représentation du comportement hypothétique des interactions entre les facteurs en jeu au cours d'une expérience. Pour lui, comme pour Legay, l'approche de Fisher a mis en évidence le fait que la mathématisation (c'est-à-dire le désir d'accroître la rigueur) du savoir biologique et agronomique passait obligatoirement par une prise en compte de la *variabilité* des phénomènes du vivant en même temps que par une *réduction* ou un contrôle de cette même variabilité au moyen de « modèles » censés « représenter »[4] hypothétiquement l'interaction entre les facteurs en cause. Là est tout l'apport de la biométrie. Le modèle sert alors de représentation juste suffisante (informationnelle comme nous l'avons appelée) pour rendre pertinente, en vue de ce contrôle opérationnel, l'information recueillie par les mesures de terrain. Pour Legay, comprendre cela devient rapidement fondamental, même s'il n'en concevra toutes les conséquences épistémologiques qu'à partir du début des années 1970 : d'une façon au départ très contre-intuitive mais, à la réflexion, compréhensible, le gain en rigueur pour l'expérimentateur passe par la prise en compte de la variabilité essentielle du vivant pour peu qu'on travaille à l'interpréter en la réduisant, notamment par la procédure fishérienne d'analyse de variance. Ainsi Vessereau écrit-il en introduction de son ouvrage principale de 1947 :

« L'expérimentateur qui opère sur la matière vivante, plantes ou animaux, se heurte à des difficultés que ne connaît pas, ou connaît à un bien moindre degré, le physicien de laboratoire. La

[1] Voir [Legay, J.-M. et Schmid, A.-F., 2002], p. 59.
[2] Ces précisions nous ont également été données par Legay lui-même au cours de notre entretien [Legay, J.-M. et Varenne, F., 2001], p. 1.
[3] Dans tout l'ouvrage majeur de Vessereau, dès 1947 semble-t-il, l'expression « modèle mathématique » est employée telle quelle, c'est-à-dire avec des guillemets, donc avec des pincettes en quelque sorte : avec une certaine répugnance. Elle sert à désigner chez lui quelque chose de très spécifique : les expressions mathématiques des hypothèses faites sur la forme des erreurs par exemple ([Vessereau, A., 1947, 1988], p. 181) ou les hypothèses (d'additivité le plus souvent) portant sur l'interaction entre les traitements agronomiques (*ibid.*, p. 196).
[4] Vessereau parle bien de *représentation* d'une hypothèse d'additivité au moyen d'un « modèle mathématique » [Vessereau, A., 1947, 1988], p. 197 : « l'effet des traitements A et B peut être *représenté* par des paramètres qui s'ajoutent purement et simplement. » C'est nous qui soulignons.

grande variabilité des caractères étudiés, les nombreuses et incontrôlables causes qui peuvent les influencer, rendent suspect, a priori*, tout résultat isolé.* »[1]

Vessereau en conclut qu'il ne faut pas se contenter d'expériences isolées ni non plus les multiplier inconsidérément. Il faut en fait les « interpréter ». Or, l'interprétation passe selon lui par la répétition d'expériences similaires mais de telle sorte que cette répétition laisse *a priori* le plus libre cours à la variabilité naturelle résiduelle. C'est cette libre expression de la variabilité qui, paradoxalement, nécessite une méthode : celle des plans d'expérience de Fisher, avec sa randomisation. Ce n'est que lorsque l'on aura laissé cette variabilité s'exprimer le plus largement dans les expériences, puis qu'elle aura été assumée et prise enfin en compte dans le modèle statistique qu'elle pourra alors être connue, si ce n'est maîtrisée, et donc finalement soustraite en quelque sorte aux mesures (mesures qui seront donc *réduites*) afin que ces dernières deviennent à leur tour interprétables biologiquement. La rigueur du savoir est donc le résultat d'un traitement non trivial des mesures dans leur variabilité même. L'expérience isolée ne nous apprend rien en elle-même parce que ses aberrations ne sont pas purifiées en quelque sorte par la comparaison avec d'autres. Les expériences ont besoin de se neutraliser et de s'analyser mutuellement pour prêter à une interprétation biologique pleine et entière. La statistique préside à l'organisation de cette analyse réciproque. Et le modèle participe de cette grille d'interprétation. Dans ce rôle crucial pour l'*interprétation*[2] de l'expérience, il supplée l'hypothèse théorique.

Au début des années 1950 Legay déploie donc ses activités d'assistant de recherche dans la sériciculture et travaille essentiellement dans cet esprit statistique et expérimental que nous avons rappelé. Mais il ambitionne dès le début de poursuivre sur une thèse. Une opportunité en ce sens va se présenter à lui qui va contribuer à infléchir sa première approche des questions biologiques vers des questions plus physiologiques.

De la sélection génétique à la physiologie – 1950 –1959

En effet, lorsque Legay avait passé son concours d'assistant de recherche au Département de zoologie de l'INRA, Pierre-Paul Grassé (1895-1985), biologiste, zoologiste et alors professeur à la Sorbonne, était au jury et l'avait remarqué. Grassé était titulaire de la chaire d'évolution des êtres organisés. Il connaissait donc bien la génétique. Mais il était aussi un spécialiste des termites et des insectes sociaux dont il avait étudié de près le comportement lorsqu'il était en poste à Montpellier. Il était un représentant éminent de l'école naturaliste « néo-lamarckienne »[3] qui résista contre l'explication de l'évolution par le seul formalisme de la génétique et par le seul hasard. Il sera par la suite connu pour résister publiquement à l'hégémonie de la génétique en soutenant notamment qu'il serait vain de vouloir n'expliquer l'évolution des espèces qu'au moyen de mutations génétiques aléatoires. Il faudra, selon lui, réhabiliter quelque peu l'idée controversée d'une influence directe du milieu sur les gènes.

Lorsque Legay rencontre Grassé, ce dernier lui propose de faire une thèse avec lui. Au vu de la position académique de Grassé comme du prestige dont il jouit, Legay ne peut qu'accepter tout de suite cette proposition. De façon compréhensible, Grassé l'incite fortement à adopter une approche physiologique du ver à soie, plus traditionnelle dans la biologie française et comparable

[1] [Vessereau, A., 1947, 1988], p. 5.
[2] C'est le mot que privilégie Vessereau pour légitimer l'introduction de modèles statistiques dans l'expérimentation agricole.
[3] Voir Jean-François Picard *in* [Picard, J.-F., 1989], p. 134.

à celle qui avait été au départ la sienne dans ses études des termites. Legay se détermine alors à quitter en partie l'approche purement génétique en travaillant à une thèse d'Etat en sciences naturelles sur la physiologie alimentaire du ver à soie : *La prise de nourriture chez le ver à soi*. Il mène à bien cette thèse en parallèle avec son travail d'attaché de recherche à Alès alors que l'INRA ne voit pas forcément d'un très bon œil cette orientation, du fait de la certaine hostilité qui règne entre cet institut de recherche et le monde universitaire[1]. Il la soutient en Sorbonne en 1955. Dans sa thèse, Legay se livre à des expériences dans lesquelles il laisse notamment des larves de ver à soie affamées pendant quelque temps de manière à pouvoir évaluer leur comportement alimentaire en dissociant expérimentalement les différents étapes d'assimilation et de croissance. Il met alors au point une technique quantitative d'estimation de la quantité de nourriture absorbée par un ver à soie. Enfin, il applique des méthodes statistiques d'estimation de la variation des caractères génétiques quantitatifs propres au dépôt des œufs du ver à soie en fonction d'une structure génétique[2] supposée donner lieu aux corrélations observées (il s'agit donc d'un modèle statistique en ce sens). Dans son travail de thèse, Legay, dans un esprit finalement assez proche de celui qui avait animé avant-guerre Teissier lors de ses travaux sur l'allométrie, arrive à mettre les nouvelles méthodes de la biométrie au service de questions plus classiques de physiologie, de morphogenèse et de biologie.

Durant ces années-là, Legay acquiert donc un regard très pluridisciplinaire sur le ver à soie. Il en a une connaissance biologique approfondie mais il travaille en même temps à avoir une vue globale sur la grande chaîne de production à laquelle ce petit animal appartient, à partir de son élevage, de son alimentation et du contrôle de sa reproduction jusqu'à la conception de la soie. Parce que, à la différence de Teissier, il a une sensibilité d'agronome et qu'il prête dès le début une attention soutenue au rôle de la science pour le bien de l'humanité, il perçoit combien les pratiques scientifiques, agronomiques et les métiers de transformation, de conception et de commercialisation de la soie sont étroitement solidaires dans cette chaîne, c'est-à-dire mutuellement conditionnées et imbriquées. En ce sens, les constats auxquels le conduit son activité semblent confirmer à ses yeux les analyses politiques que Marx et Engels avaient en leur temps menées sur le fonctionnement de la société et que lui fait connaître par ailleurs son engagement politique, notamment de par une lecture directe et personnelle des textes marxiens[3] : la complète solidarité des actions humaines. Il s'en souviendra par la suite. Le marxisme de Tessier était encore théorique, ontologique : il partait d'une contemplation précise des lois du vivant, ou plutôt des lois suivies par un organisme isolé et comme *in vitro*. Nous avions qualifié ce marxisme des biologistes quantitativistes français de « physiologisme dialectique ». Or, c'est cet isolement contemplatif qui n'est plus soutenable pour le biologiste-agronome de la reconstruction tant matérielle que morale d'après-guerre. Le marxisme de Legay sera donc davantage tourné

[1] Voir la préface d'Etienne Landais *in* [Legay, J.-M., 1997], p. 4. Par ailleurs, dans un article de 1996, Etienne Landais et Joseph Bonnemaire, chercheurs à l'INRA et à l'ENESAD, rappellent que la loi de 1946 organise de fait la « séparation institutionnelle des activités de recherche et d'enseignement en matière d'agronomie au sens large ». Voir [Landais, E. et Bonnemaire, J., 1996], p. 5. De plus l'orientation clairement zootechnique du Département de zoologie de l'INRA d'alors (liée à l'objectif de reconstruction nationale) pouvait sembler ne pas correspondre avec l'ambition plus naturaliste et plus émancipée du souci immédiat de diffusion et de développement opérationnel des techniques mises au point dans la recherche agronomique que semblait devoir incarner le conception d'une thèse d'Etat en sciences naturelles.

[2] En 1966, dans un article écrit conjointement avec sa collègue Christiane Mourgues et que nous évoquerons bientôt plus longuement, Legay co-signera le texte suivant en forme de rappel : « A un ensemble de caractères X, définis sur un même individu, c'est-à-dire se rapportant à un même organe ou participant à une même fonction, on peut évidemment associer une structure, comme l'indique l'existence même des corrélations entre caractères », [Legay J.-M. et Mourgues, C., 1966], p. 1979. Ajoutons que comme dans les modèles de Fisher, cette structure est hypothétique et elle ne sert qu'à caractériser un ensemble de variances et de covariances mesurées.

[3] Ce que nous confirme la lecture de nombreuses bibliographies de Legay.

vers la *praxis*, l'engagement politique. Il sera fondé non sur une certitude acquise au cours d'un tête à tête feutré avec les lois intimes du vivant, mais sur la certitude d'une imbrication étroite entre la pratique de la science et des théories scientifiques, la pratique des choses et des marchandises et la pratique politique des hommes[1].

Mais, en 1958, intervient un événement assez décisif dans la carrière de Legay. Le Ministère de l'Economie et des Finances décide de ne plus subventionner la production nationale de cocons de soie. La conséquence est immédiate pour la sériciculture française : elle disparaît corps et biens. Elle subit en effet de plein fouet la concurrence impitoyable des prix chinois qui font la loi sur le marché mondial. L'INRA décide alors de supprimer la station séricicole d'Alès. Les employés ne sont pas mis à la porte mais l'INRA demande que les personnes concernées fassent d'elles-mêmes des propositions de reconversion. Legay, pour sa part, et parce qu'en tant que généticien, il connaît bien la manière dont les recherches fondamentales de la génétique avaient été menées, notamment celles de Morgan sur la drosophile, a l'idée de proposer à l'INRA que l'on conserve une culture du ver à soie mais dans un autre objectif, celui qui consisterait à en faire un modèle biologique utilisable comme substitut dans le cadre de problématiques biologiques plus générales[2]. Sans qu'on lui en explique la raison, l'INRA refuse sa proposition. Legay, qui s'est entre-temps inscrit sur les listes d'aptitude, décide alors de s'orienter vers l'Université. En 1959, avec l'appui du professeur V. Nigon qui travaille en génétique sur la drosophile, Legay devient maître de conférence à la faculté des sciences de Lyon. On lui offre la possibilité de venir avec ses souches de vers à soie. Elles intéressent en effet Nigon. À Lyon, Legay enseigne la biologie à tous les niveaux et son premier laboratoire propre est d'abord celui de « physiologie des insectes ».

Retour vers la génétique et la biométrie 1959-1967

Par la suite et progressivement, Legay se détache quelque peu, mais jamais totalement, du ver à soie car son projet initial d'en faire un modèle biologique ne reçoit finalement que de faibles échos. Seul Nigon va utiliser ponctuellement ce matériel biologique, à l'occasion de ses recherches en génétique et biologie moléculaire. Entre-temps, Legay développe ses propres activités d'enseignement et de direction de travaux. En 1963, il rejoint le Laboratoire de Biométrie nouvellement créé au sein du Département de Biologie Générale et Appliquée de la Faculté des Sciences qui deviendra l'Université Claude Bernard – Lyon I en 1968. Ainsi il quitte quelque peu l'orientation fortement physiologique que lui avait donnée sa thèse d'Etat avec Grassé[3]. Mais cela ne l'empêche pas de renouer à l'occasion avec l'angle de vue quelque peu néo-lamarckien de son maître, précisément au moyen de modèles mathématiques algébriques appliqués aux caractères génétiques quantitatifs.

Ainsi, en 1966 par exemple, Pierre-Paul Grassé présente-t-il à l'Académie des Sciences[4] un des travaux que Legay a encadrés à Lyon, ceux d'une de ses doctorantes en 3ème cycle d'alors, Christiane Mourgues. Dans cette étude de génétique sur l'héritabilité différenciée de certains caractères quantitatifs de la drosophile, les deux auteurs rappellent que l'on peut toujours considérer un caractère quantitatif comme un « caractère complexe », c'est-à-dire comme un

[1] C'est à ce titre qu'il s'engagera dans la « Fédération mondiale des travailleurs scientifiques » dont il sera le président entre 1978 et 1985.
[2] [Legay, J.-M. et Schmid, A.-F., 2002], p. 59.
[3] À cette époque il publie encore régulièrement des articles sur les processus métaboliques du ver à soie.
[4] Notons que, dès 1952, Legay bénéficiera de l'appui constant de Grassé qui le présentera pour des communications régulières à l'Académie des Sciences en séance hebdomadaire.

« caractère décomposable en une série de sous-caractères »[1]. Ce faisant Legay fait fond sur l'argument fondamental de R.A. Fisher selon lequel une hérédité mendélienne multifactorielle permet toujours, au moins hypothétiquement (donc dans le cadre d'un modèle), d'expliquer les résultats mesurables par la biométrie[2]. La biométrie n'est donc pas à opposer à la génétique mendélienne. Elle peut en constituer le prolongement et l'élargissement puisqu'elle peut être vue comme ce qui mesure les conséquences empiriques particulières du déterminisme mendélien. Legay témoigne ainsi qu'il a non seulement retenu la leçon de Vessereau en agronomie expérimentale, mais aussi celle de Gustave Malécot[3] (1911-1998) en génétique mendélienne. En effet, tout comme Vessereau, le mathématicien Malécot, alors collègue de Legay à la Faculté des Sciences de Lyon et professeur de mécanique, de probabilité et de mathématiques appliquées, avait enseigné ses « mathématiques de l'hérédité » à l'ISUP dans l'immédiat après-guerre. Dans son cours que connaissait bien Legay, il mettait en valeur la convergence entre l'approche mendélienne et la biométrie, convergence à laquelle il avait lui-même contribué dans ses travaux des années 1930 et 1940.

Dans leur article de 1966, s'appuyant alors sur des plans d'expérimentations statistiques menés sur la variabilité de la répartition en surface des différentes zones que possèdent une aile de drosophile, Legay et Mourgues suggèrent que l'on puisse voir là une explication nouvelle à la variabilité dans l'héritabilité des caractères quantitatifs. Si l'on décide en effet que les caractères quantitatifs sont en fait complexes, c'est-à-dire qu'ils sont composés d'un ensemble de sous-caractères quantitatifs eux-mêmes en interaction, on peut alors comprendre cette variabilité dans l'héritabilité du caractère quantitatif global comme étant le signe d'*un effet du milieu* sur cette interaction et donc ensuite sur cette même héritabilité globale. D'après les plans d'expérience, cet effet existe bien (même si les auteurs reconnaissent n'en pas connaître la nature ni le mécanisme[4]) et il intervient en privilégiant certaines combinaisons mutuelles de ces sous-caractères, ce qui mène à certaines valeurs elles-mêmes privilégiées au niveau du caractère quantitatif global. Du coup, on peut admettre que l'effet du milieu ne soit pas compréhensible à ce niveau intégré mais qu'il puisse le devenir à un sous-niveau, ce qui n'est valable en revanche que si l'on prend la décision de modéliser ce caractère de façon complexe. Dans le travail de Legay et Mourgues, par exemple, le modèle mathématique du caractère quantitatif intégré (la surface totale de l'aile) est exprimé sous la forme d'une simple combinaison algébrique linéaire des sous-caractères (les surfaces de chacune des 6 zones de l'aile). Ce pourrait être ainsi les coefficients multiplicateurs de cette combinaison linéaire qui seraient différemment affectés et privilégiés par le milieu, comme le suggèrent les auteurs. Expérimentalement, Christiane Mourgues a recueilli les valeurs des paramètres donnant lieu à des extremums d'héritabilité. Selon Legay et sa collègue, ces mesures et ces considérations statistiques fondées sur un modèle linéaire de dépendance algébrique permettent d'imaginer l'existence *a priori* de « voies privilégiées »[5] dans l'évolution. Ce mécanisme d'évolution pré-orientée par le milieu présente l'intérêt pour les auteurs de ne pas être

[1] [Legay, J.-M. et Mourgues, C., 1966], p. 1979.
[2] En 1948, dans la célèbre publication de son cours de l'ISUP, Malécot écrit : « Ce schéma général de l'*hérédité mendélienne multifactorielle* sera développé en détail dans le chapitre II, comme expliquant tous les résultats de la *biométrie* fondée par Galton et Pearson », [Malécot, G., 1948], p. 4. C'est l'auteur qui souligne.
[3] Nous n'évoquerons pas ici davantage la figure importante de ce mathématicien et généticien français dans l'histoire de la génétique des populations. Pour un historique de son travail, nous renvoyons à [Malécot, G. et Bocquet-Appel, J.-P., 1996] et à [Nagylaki, T., 1989].
[4] Là est bien sûr tout l'intérêt d'une modélisation statistique purement informationnelle ou descriptive : pouvoir supposer l'existence de « mécanismes » sans être obligé de les définir intrinsèquement.
[5] [Legay, J.-M. et Mourgues, C., 1966], p. 1980.

« d'origine exclusivement interne »[1]. Mais les auteurs n'en disent pas davantage. À une époque où le lyssenkisme n'est plus qu'un lointain et mauvais souvenir, la prudence est certes encore de mise. Mais Legay rejoint tout de même ainsi une des préoccupations de son maître Grassé : le fait de mettre en valeur l'*unité* tant fonctionnelle que structurelle de l'organisme comme l'injonction de ne pas l'étudier de façon morcelée. C'est ce que Legay, pour sa part, traduit en termes de « complexité ». Certes, en même temps, ce sens de la complexité permet aussi à Legay d'évoquer la présence (et non la nature car le modèle statistique n'est qu'informationnel : il ne prétend représenter aucun mécanisme) d'un rôle du milieu dans l'évolution avant même ou à côté de la phase de sélection adaptative.

Quoi qu'il en soit, il est certain que Grassé présente ce travail de son élève Legay à l'Académie parce qu'il va dans le sens de l'hypothèse d'un mécanisme autre que purement mutationnel et aléatoire pour l'évolution. Nous ne développerons pas davantage ici les éventuelles accointances du travail de Legay de cette époque avec le néo-lamarckisme français, d'une part parce qu'il semble en fait s'être prudemment avancé sur ces matières[2] et que, d'autre part, son travail s'est orienté de nouveau par la suite vers des questions d'ordre moins directement génétique. Enfin, il faut noter que l'accord entre Grassé et Legay sur ces questions de nature plus philosophique doit, à cette époque-là, atteindre assez vite ses limites. En effet, sans vouloir simplifier les idées de Grassé à outrance, n'oublions pas que le chrétien qu'il est reste surtout choqué par la trop grande importance donnée au hasard dans certaines versions du darwinisme, cela au détriment de toute éventuelle providence. Le penseur social, le penseur de la liberté[3] émancipé de toute représentation d'une providence qu'est Legay ne peut donc se sentir d'accord avec lui sur ce point précis. Mais on voit bien que Legay, pour sa part, se fonde néanmoins sur le principe, selon lui confirmé par sa pratique agronomique, que *tout est lié* et que l'organisme, voire la nature en son ensemble, est toujours à traiter comme un tout … Et cette idée, base de son épistémologie, se renforcera encore par la suite comme nous le verrons bientôt. Or, c'est bien évidemment plutôt cette perspective que l'idée d'une éventuelle pré-orientation de l'évolution sur laquelle il fait fond. Grassé et Legay sont donc attirés pour deux raisons différentes vers la même réhabilitation d'un rôle du milieu dans les mécanismes d'évolution. En tous les cas, pour notre enquête plus spécifique, le travail de Legay et de sa collègue nous permet de discerner sur un cas particulier le type de contexte dans lequel il a été de plus en plus amené à considérer que la pratique des modèles allait de pair avec la *décision de la complexité*. Cependant, en 1966, son épistémologie des modèles n'est pas encore définitivement ni complètement formée. Un certain nombre d'autres rencontres avec les diverses pratiques de modélisation seront pour cela nécessaires.

---

[1] [Legay, J.-M. et Mourgues, C., 1966], p. 1980.

[2] Il condamnera toujours fermement mais bien sûr *a posteriori* la méthode de Lyssenko dans ses travaux des années 1970. Rappelons en effet qu'il n'a que 23 ans lorsque l'affaire éclate en France… C'est donc bien plus tard qu'il condamnera le lyssenkisme. Il le fera surtout en référence à sa propre épistémologie pragmatique des modèles et à sa décision pour la complexité irreprésentable de la nature : selon lui, Lyssenko fera partie des scientifiques qui se sont rendus coupables de transformer en mythe ou en idéologie (ce qui signifie pour lui la même chose) un simple modèle pragmatique. Cela se manifeste, comme dans la sociobiologie de E. O. Wilson, par le fait de croire et de faire croire que les mots ont toujours le même sens et colportent les mêmes contraintes et visions du monde, qu'il soient utilisés dans un cadre scientifique ou dans un cadre politique. Selon Legay, Lyssenko s'est rendu coupable de faire croire qu'un mécanisme conservateur en science de l'hérédité valait pour une confirmation du conservatisme en politique : « Mais un mécanisme conservateur en génétique et un mécanisme conservateur en politique n'ont pas la même signification, et s'appuyer sur l'un pour justifier l'autre relève *seulement* et *complètement* de la malhonnêteté intellectuelle et de l'exploitation d'un public mal informé, à qui il est facile de ne livrer qu'une partie de la vérité », [Legay, J.-M., 1981], p. 76. C'est l'auteur qui souligne.

[3] Il écrira en 1981 : « Le mérite essentiel que revendique la méthode scientifique est seulement de permettre à l'humanité de sortir du règne de la nécessité », [Legay, J.-M., 1981], p. 39.

Mais si l'on veut déjà jeter un regard rétrospectif sur les premiers travaux de Legay en cette fin des années 1960, on voit que, s'il publie encore un certain nombre de travaux sur la physiologie du ver à soie, Legay s'est surtout orienté vers les différents usages de la modélisation statistique tous azimuts, que ce soit en génétique des populations, en biométrie ou même en anthropométrie. Ainsi, en 1967, publie-t-il avec sa collègue Annie Heizmann un travail statistique sur la détermination par le sexe de la dissymétrie et de la taille relative des doigts chez les humains (rapport entre la taille de l'index et celle de l'annulaire). Partant de l'activité génétique de sélection et de la pratique agronomique de la biométrie, Legay s'est ainsi considérablement ouvert à tout l'éventail des domaines d'application de la modélisation statistique ; et il commence alors à passer constamment d'un domaine de la biologie à un autre. Ce qui d'ailleurs lui sera rapidement et bien souvent reproché par ses collègues, qu'ils soient agronomes, généticiens ou physiologistes.

La rencontre avec les modèles mathématiques de la biophysique : graphes et ramifications

Par ailleurs, au cours de ces années 1960, Legay semble élargir encore son spectre des méthodes mathématiques en biologie. Il prend une connaissance plus approfondie des travaux de Rashevsky dans la mesure où il peut bénéficier de la troisième édition, parue en 1960, de son ouvrage principal : *Mathematical biophysics, physico-mathematical foundations of biology*. Or, à cette lecture, une suggestion vient à l'esprit de Legay : il pense qu'il peut personnellement contribuer à une recherche théorique sur les phénomènes de reproduction et de croissance en travaillant en même temps à lier les deux traditions de formalisation mathématique jusque là fortement indépendantes. Au contact avec les propositions récentes de Rashevsky, Legay s'aperçoit en effet qu'une approche populationnelle (telle que celle qu'il pratique en génétique des populations) peut désormais coïncider avec une approche des phénomènes de reproduction en général au moyen de la théorie des graphes telle qu'elle est préconisée par le biophysicien américain. Les « mathématiques de l'hérédité » de Gustave Malécot (1948) auxquelles il s'est formé depuis son passage à l'ISUP, laissant une large place aux processus de ramification, peuvent en effet être interprétées en termes de graphes. Pour Legay, il y a là l'espoir de croiser les destins de ce qu'il appellera plus tard la modélisation théorique « descendante » et la modélisation empirique « ascendante »[1]. Legay s'en ouvre à Rashevsky qui semble intéressé par la proposition de son collègue français. De surcroît, Rashevsky lit Legay en français car on se souvient qu'il avait séjourné quelque temps en France. Ce qui facilite grandement le dialogue entre eux et contribue à les rapprocher malgré la distance géographique.

Avant que nous n'évoquions l'apport de ce travail pour la pratique de modélisation mathématique, une question demeure cependant : comment expliquer que Legay se lance dans cet effort supplémentaire d'acquisition de méthodes mathématiques nouvelles pour lui ? Sa motivation peut-elle n'être que de nature théorique ? Cela semble bien peu crédible au vu de ce

[1] [Legay, J.-M., 1997], pp. 44-49. L'approche descendante consiste à partir d'une construction formelle existant déjà dans un autre domaine (mathématique, physique, chimie, etc.) pour élaborer un modèle général d'une situation biologique avant de la particulariser. L'avantage de cette méthode est qu'elle est facile et rapide à mettre en œuvre au départ. Mais il faut, après coup, vérifier sur la situation biologique concrète « la pertinence des hypothèses et l'adéquation des transpositions car on pourrait être entraîné vers des interprétations délirantes », [Legay, J.-M., 1997], p. 46. À l'inverse, la méthode de modélisation mathématique ascendante consiste à partir de la situation biologique concrète et de l'objectif que l'on se fixe par avance. Elle consiste à construire un « instrument de recherche » précisément adapté. C'est une construction lente, difficile et pas à pas, mais le temps perdu au départ est gagné par la suite car « le modèle auquel on arrivera a évidemment beaucoup plus de chance d'avoir un sens et d'être efficace », [Legay, J.-M., 1997], p. 47. C'est cette approche que Legay privilégiera finalement après s'être essayé à la méthode descendante dans cet article de 1968.

que nous avons commencé à comprendre de ses perspectives propres. N'est-ce pas plutôt qu'il cherche également par là à élucider un point d'une de ses problématiques plus concrètes ? Nous pensons que Legay voit là en effet tout l'intérêt qu'un tel projet peut avoir pour l'éclaircissement de sa propre problématique récurrente, celle du comportement alimentaire du ver à soie, notamment en vue de son amélioration morphologique. Comme nous l'avons dit, pendant les années 1960, à côté de travaux plus directement statistiques, Legay continue à étudier le ver à soie avec un certain nombre de doctorants de troisième cycle. Or, on constate que son centre d'intérêt à ce sujet se déplace de l'analyse du comportement métabolique de l'organisme tout entier vers l'analyse des seuls processus morphogénétiques de l'œuf du ver à soie. En fait, dès sa thèse de 1955, Legay s'était intéressé à l'œuf et il avait noté en biométricien les fortes variations pouvant intervenir sur son poids. Selon lui, dès lors que l'on peut considérer l'œuf en formation comme un « système morphogénétique » relativement autonome et simplifié[1], l'étude de la morphogenèse de l'œuf peut paraître un passage obligé vers la compréhension de la morphogenèse des organismes. En 1979, il rappellera sa conviction initiale en des termes dépourvus d'ambiguïté :

« La morphogenèse la plus simple est celle d'une cellule. Il me paraît nécessaire et utile, avant d'essayer de comprendre la morphogenèse des organismes, de saisir celle d'une cellule. C'est particulièrement le cas [ici] parce que la cellule dont nous discutons ne forme pas une partie d'un tissu 'normal' mais est plutôt largement autonome. »[2]

Or, on peut supposer raisonnablement que dans un premier temps, lorsqu'il lit les essais de Rashevsky sur la croissance des organismes, il n'est pas vraiment convaincu par cette perspective exclusivement théorique du fait de sa propre sensibilité biochimique et physiologique. Mais certains indices nous permettent de comprendre que, la formation de l'ovule des métazoaires restant à l'époque encore un centre d'intérêt récurrent chez lui, il a pour idée que l'approche théorique plus récente de Rashevsky, notamment par les graphes, par les « relations d'un à plusieurs » et les *épimorphismes*, consone tout de même avec la représentation cytologique et biochimique qu'il a des processus sous-jacents à la morphogenèse de l'œuf. Précisons en effet qu'à partir de 1959, et pendant au moins une quinzaine d'années, dans le cadre de son laboratoire de Lyon, Legay procèdera et fera procéder à des mesures systématiques sur la croissance des œufs du ver à soie et sur sa variabilité. Or, dans l'article théorique de 1968, même s'il ne le présente pas comme sa motivation principale, le projet de modéliser précisément ce phénomène de croissance se retrouve bel et bien invoqué en première place lorsqu'il s'agit de proposer des domaines dans lesquels le modèle général qu'il construit pourrait être utilisé. Ainsi écrit-il : « La formation de l'ovule des métazoaires requiert la participation d'une série de cellules glandulaires endocrines et dans un certain sens, on peut dire qu'il en est la descendance. »[3] Dans ce passage-clé de l'article de 1968, on voit donc bien que c'est la *problématique physiologique de la croissance et de la morphogenèse* qui peut désormais sembler abordable à Legay par une technique empruntée à la modélisation mathématique de l'hérédité telle qu'elle intervient déjà en génétique des populations. Même si Legay ne l'explicite pas formellement en ces termes, on peut donc supposer qu'il est alors tenté de concilier les deux écoles de modélisation (théorique et

[1] Voir la reprise de cette idée fondatrice chez lui *in* [Legay, J.-M., 1979], p. 141.
[2] "The most simple morphogenesis is that of a cell. It seems to me necessary and useful, before trying to understand the morphogenesis of organisms, to comprehend that of a cell. This is especially so because the cell we are discussing does not form part of a 'normal' tissue but rather is largely autonomous", [Legay, J.-M., 1979], p. 141.
[3] [Legay, J.-M., 1968], p. 35.

statistique) précisément *parce qu*'il a en vue sa propre problématique physiologique de croissance et de morphogenèse, à commencer par la croissance de l'œuf du ver à soie. On peut penser ainsi qu'il cherche, entre autres, à *interpréter* au moyen d'un modèle mathématique testable l'ensemble des données biométriques dont il dispose par ailleurs dans son laboratoire. C'est là un cas de tentative de transfert des mathématiques de la génétique formelle vers des questions morphologiques et physiologiques au motif que la notion de « descendance » traverse tous les niveaux d'organisation du vivant et passe pour davantage qu'une simple analogie. Cette analogie-identité ne vaut elle-même que parce que l'approche populationnelle renouvelle en un sens la question traditionnellement physiologique de la morphogenèse. Ce serait donc parce qu'il est d'abord poussé par sa problématique scientifique propre que Legay travaille à concilier l'approche biophysique et l'approche biométrique de la modélisation. Ceci est important à signaler car, par la suite, nous verrons qu'il continuera à travailler à cette conciliation mais dans un cadre plus large et porté par des convictions et des besoins nettement moins ancrés dans une problématique de recherche particulière.

Toujours est-il qu'en 1968, avec la bienveillances et le contrôle de Rashevsky lui-même et dans le cadre de son *Bulletin of Mathematical Biophysics*, Legay propose une « théorie générale de la croissance d'une population »[1] (finalement publiée telle quelle, en français !). Pour ce titre d'article, Legay concède en fait le terme de « théorie » à Rashevsky. Ce dernier se trouve en effet avoir contrôlé et relu de près[2] son travail. Mais, dans le corps du papier, Legay parle surtout de « modèle général » ou de « vocabulaire » : « L'un des buts essentiels de ce texte est d'établir un vocabulaire non ambigu permettant de décrire n'importe quel phénomène de reproduction. »[3] Dans ce travail, inspiré donc en partie par le tournant mathématique récent de Rashevsky vers la théorie des graphes et son insistance sur le « principe de l'épimorphisme », Legay constate que, de son côté, et avec des outils plus proprement statistiques, il est désormais possible de jeter un pont entre la modélisation statistique de la génétique et les formalisations de la biologie théorique. Ce pont existe si l'on se penche par exemple sur les processus de reproduction au sens large (multiplication, réplication, ramification, épidémie, copie, etc.) tels qu'ils interviennent dans le vivant. Il s'agit toujours pour les deux points de vue d'une modélisation d'un processus ramifié en général. Parce qu'il a notamment l'idée de conjoindre formellement le traitement des questions d'hérédité et celui des questions de croissance et de morphogenèse (du fait qu'il adopte également une approche populationnelle de la morphogenèse), dans le cadre très large d'une problématique de croissance d'une population, Legay veut généraliser la *discrétisation* des modèles telle qu'elle est déjà intervenue en génétique pour les « mathématiques de l'hérédité », notamment avec les travaux de Gustave Malécot sur lesquels il s'appuie, afin de l'appliquer à des questions biologiques plus générales et accessibles jusque là seulement par la biométrie, comme la croissance d'organes ou d'organismes. Sans qu'il l'exprime ainsi, l'approche généalogique de la question de l'identité génétique telle qu'elle est prônée par Malécot et son école lui semble donc transposable à d'autres problématiques de reproduction où la biométrie a déjà sa place.

Dans cet article donc, sur le modèle de l'algèbre et d'une théorie des graphes sommaire, Legay définit un ensemble de concepts formels comme l'*élément*, la *population*, la relation

[1] [Legay, J.-M., 1968].
[2] On se souvient de l'exigence de Rashevsky à l'égard des publications qu'il autorisait, même et surtout lorsqu'il s'agissait d'un de ses élèves. Voir, *supra*, le cas de Robert Rosen.
[3] [Legay, J.-M., 1968], p. 33. Le biologiste mathématicien canadien Roger Jean parlera du « vocabulaire de Legay » à ce sujet. Voir [Jean, R. V., 1978], pp. 184-185.

(réflexive, antisymétrique et transitive) de *reproduction*[1], le *parent*, la *famille*, etc. On a alors une *population* soumise à une *reproduction* d'*ordre* (N, P), par exemple, dans laquelle à P *parents* correspondent N *enfants*. La *distance* temporelle ou spatiale entre parents et enfants est la distance qui sépare les deux opérations de reproductions « celle qui a donné naissance à l'enfant et celle qui fait de l'enfant un parent »[2]. Legay introduit ensuite une dimension temporelle dans son formalisme puisqu'il définit aussi des relations de reproduction *synchrones* ou *asynchrones* eu égard au caractère régulier ou non de la distance entre générations. En fonction d'hypothèses sur l'ordre de la reproduction et son caractère synchrone ou non, Legay ne cherche alors à exprimer quantitativement que le *nombre* total d'éléments en présence à chaque génération[3]. Ce qu'il parvient à faire en général au moyen de formules algébriques récursives (il s'agit de suites arithmétiques calculables). Ce formalisme lui permet de modéliser notamment les phénomènes de retard dans la reproduction, phénomènes dont Legay juge qu'il sont particulièrement importants car ils permettent d'expliquer la dégénérescence, que l'on peut mesurer parfois, de certains modèles de croissance qui serait sinon exponentielle[4]. Il peut aussi prendre en compte les phénomènes de mortalité ou de changement d'ordre de reproduction entre générations.

Rashevsky et Legay

Pour Legay, l'intérêt certain qu'il y a à disposer d'un tel « modèle général » vient du fait que l'on peut déduire ensuite commodément le modèle particulier qui s'adapte à la situation biologique qui nous occupe. Mais tout en disant cela, Legay ne paraît pas totalement convaincu. Car, ce qu'il montre au fond et ce qu'il tient surtout à dire dans cet article de 1968, c'est que plusieurs modèles particuliers (à hypothèses spécifiques différentes) peuvent en fait donner lieu à une même forme mathématique finale. Si bien que sans une connaissance approfondie du contexte et des données expérimentales, le théoricien ne disposera jamais de l'information permettant de se décider pour tel ou tel modèle particulier :

« *Ainsi les phénomènes de retard, qui conduisent à des modèles distincts de la croissance exponentielle normale, peuvent être dus à des causes très diverses : augmentation de la distance entre deux opérations de reproduction, modification de l'ordre de la reproduction, mortalité des parents. Dans ces cas bien différents, l'allure de la croissance peut être la même. Par suite,* l'interprétation d'une courbe de croissance impliquera toujours une analyse expérimentale complète. »[5]

Donc si Legay semble, à une première lecture, se plier à l'épistémologie de Rashevsky, tel n'est pas véritablement le cas, à bien y regarder. Dès le départ, nous avions noté que Legay parle de « modèle général » de la reproduction là où Rashevsky voudrait que l'on parle de « théorie ».

[1] Legay précise que la « représentation » des relations de reproduction « constituent un graphe », [Legay, J.-M., 1968], p. 34.
[2] [Legay, J.-M., 1968], p. 35.
[3] L'attention au seul dénombrement chez lui sera à comparer à l'attention à la topologie de la structure concrète ramifiée (avec une distinction entre la gauche et la droite de la cellule, etc.) obtenue à chaque étape et qui caractérisera le travail de Lindenmayer publié la même année. Nous en évoquerons la genèse plus bas. De façon significative, le graphe dessiné pour Legay n'est qu'une représentation de son modèle mathématique, mais pas le modèle lui-même qui, pour sa part, reste écrit sous une forme symbolique et est strictement mathématique en ce sens. Il doit nous faire aboutir au mieux à un dénombrement.
[4] [Legay, J.-M., 1968], p. 41.
[5] [Legay, J.-M., 1968], p. 45. C'est l'auteur qui souligne.

Souvenons-nous en effet que Rashevsky est toujours prioritairement en quête de principes biologico-mathématiques qui puissent transcender tout modèle mathématique particulier. Le modèle mathématique est chez lui déconsidéré même s'il est finalement reconnu, quoique tardivement, dans son existence. Pour lui, le modèle n'intervient que lorsqu'il faut adapter la théorie à une situation singulière. En 1968, Rashevsky pense qu'il faut que le biologiste théoricien s'oriente vers l'expression formelle de principes relationnelles si généraux qu'ils puissent ensuite être spécifiés dans chaque situation, comme c'est le cas en physique pour la relation fondamentale de la dynamique. On comprend alors ce qui a pu séduire Rashevsky dans la proposition de Legay et ce qui a pu entraîner une sorte de malentendu profitable à Legay, en dernière analyse. C'est le fait qu'il reprenne son idée d'une généralité des relations épimorphiques, relations que Legay interprète pourtant déjà spécifiquement lorsqu'il parle seulement de relations de « reproduction ». De surcroît, chez Legay, Rashevsky accepte une fois de plus ce qu'il avait déjà du mal à laisser passer chez Rosen : le fait que son relationnisme en biologie soit interprété en termes de relations entre *structures* concrètement c'est-à-dire spatio-temporellement définies plutôt qu'entre *propriétés* ou *fonctions* de ces mêmes structures. Rashevsky prône dès le début un relationnisme des *fonctions*, alors que Legay propose de déployer un relationnisme des *populations d'individus* concrètement définis et situés, cela à tous les niveaux organiques : molécules, cellules, organes, organismes, etc.

Mais ce qui marque le plus la différence d'interprétation, derrière l'accord de façade, entre les deux épistémologies en présence ne peut se comprendre que si l'on revient sur l'esprit particulier qui anime Legay lors de la conception de ce travail à visée unificatrice pour la pratique des modèles. En effet, il ne faut pas oublier d'où il vient et d'où il parle. Legay a d'abord été formé à l'école fishérienne des plans d'expérience, certes modifiée entre-temps par la vision moins déterministe de Malécot (sa bibliographie est exclusivement biométrique mis à part le livre de Rashevsky)[1]. On conçoit qu'il ne puisse et ne veuille interpréter et intégrer les formalismes de Rashevsky que dans une perspective plutôt conventionnaliste. Ce que Rashevsky appelle encore une théorie, Legay l'appelle donc un simple « modèle général ». Ce « modèle général » dessine *a priori* les scénarios possibles et impossibles que peuvent suivre les phénomènes naturels. Pris dans sa généralité, et de ce point de vue strictement informationnel, le « modèle général » ne résumerait aucune expérimentation spécifique, mais il les résumerait toutes virtuellement : il n'aurait donc encore aucune valeur épistémique pour Legay. Toutefois, ce dernier adopte tout de même à ce moment-là (1968) l'idée que l'on puisse parfois construire un modèle général de façon profitable. Mais il est à concevoir pour lui seulement au titre d'un « vocabulaire », d'un langage, d'une façon de parler[2]. Alors que c'est précisément le moment où il a le plus de valeur du point de vue de Rashevsky car il voisine ainsi avec les plus grands principes formels dont on sait qu'ils sont, pour lui, ce qu'il y a de plus stable et de plus général, d'après ce qui se passe en physique notamment. Mais c'est en se spécifiant, en donnant lieu à la déduction de modèles particuliers que la valeur explicative ou plutôt *interprétative* du modèle est en revanche la mieux fondée pour

[1] [Legay, J.-M., 1968], p. 46.

[2] Voici un exemple qui montre bien que, pour l'expérimentateur et biométricien qu'est Legay, le modèle général peut tout au plus servir à *suggérer* un scénario sous-jacent. En 1974, dans une étude expérimentale au cours de laquelle Legay et une de ses étudiantes, mademoiselle Aline Tran-Bugnot, confirmeront l'existence d'une loi de décroissance exponentielle du poids, au cours d'une même ponte, des œufs du ver à soie (*Bombyx mori*), les auteurs s'exprimeront prudemment en ces termes : « L'allure exponentielle de cette loi permet de suggérer une diminution de la croissance des ovocytes (selon le rang) en fonction de la quantité de réserves encore disponibles dans la chrysalide », [Legay, J.-M. et Tran-Bugnot, A., 1974], p. 1519. Même s'ils disposent d'un modèle général, les auteurs s'appuient sur le manque de données physiologiques et biochimiques au niveau du suivi de la croissance et des substances impliquées pour légitimer leur refus de se prononcer.

Legay. Or, nous savons que, dans ce cas-là, Rashevsky admet que l'on a bien affaire à des modèles mathématiques. Et c'est donc finalement sur l'application du formalisme mathématique à une situation biologique *singulière* qu'il y a tout de même un accord minimal entre les deux traditions au sujet de l'emploi de l'expression de « modèle mathématique ». Dès lors nous comprenons que ce type de confrontation ait pu mener Legay à considérer que la définition de la *situation particulière* et de *l'objectif particulier* était un préalable indispensable à la construction de tout modèle mathématique. Car, là-dessus, il obtiendra un accord tant du côté des théoriciens qui recherchent une théorie mathématique constitutive que des esprits formés à la statistique. Pour Rashevsky, comme pour Legay, il y a modèle mathématique quand, à un autre niveau que celui de la théorie, on a affaire à une formalisation mathématique d'une situation biologique très particulière. Pour Rashevsky, il reste toutefois possible et souhaitable de dépasser cette particularité en travaillant à concevoir des théories qui puissent être candidates au titre de principe biologico-mathématique fondamental. Pour Legay, en revanche, il est trompeur d'adopter exclusivement ce point de vue de surplomb. Car il mène inévitablement à un type de modélisation descendante et l'on peut s'y bercer de l'illusion que l'expérimentation n'est pas nécessaire pour identifier précisément le modèle, ce qui est une erreur. Pour extraire de l'ambiguïté un modèle général, on aura toujours besoin de toute l'information empirique dont on a également besoin lorsque l'on pratique une modélisation ascendante. Donc autant procéder directement de cette seconde manière, même si elle paraît plus fastidieuse au premier abord ! En 1968, on le voit, même s'il s'en réclame, Legay n'est donc pas loin d'admettre que la notion de « modèle général » est totalement superflue voire trompeuse. Mais il faudra attendre quelques années encore pour que cette conviction s'affirme notamment au contact avec un problème plus particulier de modélisation de croissance des plantes.

Mais auparavant, il reste à nous demander comment Legay a été conduit à refuser que le modèle ne soit qu'une représentation de cette situation biologique particulière. Pour le comprendre, il nous faut d'abord évoquer trois autres faits majeurs et qui sont intervenus de manière quasiment contemporaine dans sa vie et donc dans son évolution épistémologique : sa rencontre avec la source cybernétique de la modélisation et avec les réflexions qui existent déjà dans ce contexte particulier, sa forte implication dans le groupe « Méthodologie pour l'écologie » de la DGRST et enfin le malaise qu'installent durablement les critiques répétées et acerbes des philosophes néo-marxistes au sujet de la méthode des modèles au début des années 1970.

La biocybernétique, la systémique et ce qu'en retient Legay : tout est lié - 1967-1971

En 1967 et en 1970, Legay se rend au 5ème et au 6ème congrès de cybernétique de Namur. Ces congrès sont organisés par l'Association Internationale de Cybernétique, fondée à Namur en 1957[1]. Sous l'impulsion de la Société pour l'Avancement de la Théorie du Système Général créée aux Etats-Unis en 1954 autour de Bertalanffy et Quastler, l'époque est en effet aux développements de l'« analyse des systèmes » et de la « systémique » dans ses applications, parfois les plus fantaisistes, à la biologie et à l'écologie. C'est l'heure de la biocybernétique. Or, c'est dans ce cadre-là que Legay est amené à renforcer ses contacts avec les cybernéticiens, notamment avec l'école roumaine de cybernétique. Ces rencontres lui sont facilitées d'une part parce que les roumains s'expriment souvent en français mais d'autre part du fait de ses

[1] Le premier Congrès International de Cybernétique de Namur (Belgique) s'est tenu en juin 1956. L'Association Internationale de Cybernétique est alors fondée à Namur en janvier 1957. Par la suite, elle organisera jusqu'en 1998 un congrès international tous les 3 ans de 1958 à 1998 et elle en publiera les actes.

sympathies politiques. En effet, après une période de refus d'une pseudo-science à origine bourgeoise telle que se présentait la cybernétique[1], le bloc de l'est, en partie du fait de son dynamisme en recherches mathématiques mais aussi parce que la cybernétique va finalement devenir le bras armé d'une vision dialectique et d'une rationalisation marxiste des sciences humaines (comme l'architecture par exemple), a en effet fortement contribué, dès le début des années 1960 au développement de la modélisation cybernétique appliquée à la biologie. À Namur, Legay rencontre donc, entre autres, Edmond Nicolau (1922 – 1997), Marianne Belis (née dans les années 1940)[2] et Nicolae Teodorescu (né en 1908)[3]. Devant ces manifestations biocybernétiques, Legay ne sera pas absolument fasciné par les modèles théoriques des intervenants même s'il reconnaîtra l'importance et l'omniprésence des boucles de retro-contrôle (positive ou négative) en biologie. Bien plutôt, il se persuadera que l'interdisciplinarité doit désormais être fondamentale dans la recherche sur ces systèmes complexes que sont les êtres vivants ou les sociétés dès lors que, dans la nature, *tout est lié*. Mais comment en vient-il à la confirmation de ce qui avait déjà été une intuition de jeunesse ?

Il faut rappeler que le mathématicien Teodorescu que rencontre Legay est alors une personnalité influente en mathématiques appliquées. Toute une école de cybernétique s'est assez tôt constituée autour de lui. En 1963, fort de ses expériences multidisciplinaires en mathématiques appliquées (architecture, physique, électrotechnique, biologie…) remontant à la fin des années 1940, il a fait paraître un ouvrage en roumain vantant les mérites de cette nouvelle méthode de formalisation dans les sciences et en biologie en particulier : la « modélisation mathématique ». Il y défend l'idée qu'avec la modélisation cybernétique, on a désormais affaire à une nouvelle étape dans la mathématisation en biologie et qu'elle est à penser en rupture avec l'étape antérieure de la biométrie. Dans le cas de la biométrie et de la représentation statistique, on a affaire à une méthode mathématique qui n'est applicable que pour l'*interprétation* des résultats et leur mise en valeur, alors que dans le cas de la modélisation[4] cybernétique, on a affaire à un instrument d'*investigation* des phénomènes[5]. En reprenant les mots mêmes de S. M. Milcou, un de ses collègues endocrinologues et membre, comme lui, de l'Académie des Sciences roumaines et qui se fait pour un temps son porte-parole, « un modèle [cybernétique] est capable de mettre en évidence des caractères inconnus difficilement accessibles », et « il peut nous permettre de découvrir de nouveaux aspects des phénomènes modelés [*sic*] »[6]. Le neurologiste Constantin

[1] Voir sur ce point d'histoire [Segal, J., 2003], pp. 320-329.

[2] Dans ces années-là, Marianne Belis était étudiante en doctorat d'intelligence artificielle à l'Institut Polytechnique de Bucarest. Elle a poursuivi par la suite des recherches en modélisation sémantique de l'information, en théorie de la décision et en management des incertitudes. Elle vit actuellement en France où elle est directrice de l'Ecole Supérieure d'Informatique, école d'ingénieur dans laquelle elle enseigne l'informatique et l'intelligence artificielle.

[3] Teodorescu a soutenu une thèse en mathématiques à la Sorbonne en 1931 avant de devenir professeur de mathématiques appliquées à l'Institut Polytechnique de Bucarest. À partir de 1942, il enseigne la géométrie projective dans le département d'architecture. À partir de 1948, il enseigne également à la faculté d'électrotechnique du même institut. À partir de 1949 et de la fondation de l'Institut de Mathématiques de l'Académie Roumaine des Sciences, il est responsable de la section « équations différentielles et équations aux dérivées partielles » de cette section de l'Académie. Il développe alors une méthode vectorielle pour la résolution d'équations aux dérivées partielles en physique mathématique. En 1949, il est un membre du Conseil Central provisoire constituant la Société des Sciences Mathématiques et Physiques de la République Populaire de Roumanie. Dans son Acte de Constitution, cette Société, liée organiquement au Parti Roumain des Travailleurs, s'engage notamment à améliorer le « niveau scientifique et idéologique des mathématiciens et des physiciens en conformité avec l'idéologie marxiste-léniniste » ainsi qu'à lutter « contre les courants idéalistes et réactionnaires dans ces disciplines ». Pour ces renseignements et les extraits de l'acte, nous avons fait appel au site de cette société savante (qui existe toujours) accessible à l'adresse http://www.ssmro.com/fr/htm/istssmr/ssmr/smf.htm.

[4] À la fin des années 1960, les articles français des scientifiques roumains qui sont dans la mouvance de Teodorecu proposent alors souvent le terme de « modelage ». Voir [Milcou, S. M., 1971] et [Balaceanu, C., 1971].

[5] Voir [Milcou, S. M., 1971], p. 236.

[6] [Milcou, S. M., 1971], p. 236.

Balaceanu (né en 1923) reprend également l'idée de son collègue mathématicien Teodorescu lorsqu'il s'exprime ainsi, en 1971 :

« On doit découvrir de nouvelles propriétés, on doit pouvoir approfondir la connaissance de la réalité en utilisant l'appareil mathématique non seulement comme un instrument de description *mais comme un* instrument de recherche *[…] il s'agit de souligner que la formalisation mathématique doit faire émerger des faits nouveaux qui puissent nous conduire plus près de l'essence du phénomène que nous étudions. »*[1]

C'est le formalisme mathématique qui est donc à l'honneur dans cette conception roumaine de la modélisation cybernétique dès lors qu'il possède ce pouvoir étonnant, propre en fait aux mathématiques dont il est constitué, de donner à discerner dans les mesures ce qui est resté inaperçu. Or, s'il se trouve qu'on utilise un ordinateur pour traiter ce modèle, c'est que l'on procède à une simple « transcription » de la formulation mathématique sur une machine qui a la capacité de la résoudre, de la calculer. C'est pourquoi, pour Balaceanu, on doit simplement parler dans ce cas de « modèle sur un calculateur »[2]. Certes l'usage de l'informatique permet de persuader davantage de biologistes expérimentateurs de la nécessité d'une étape de formalisation claire et précise[3]. C'est là pour les roumains un apport indéniable : l'informatique précipite les biologistes dans l'ère des modèles. Mais, avec l'informatique, le changement dans l'usage des modèles mathématiques, à proprement parler, n'est que quantitatif. À aucun moment, il n'est question de simulation pour Balaceanu puisque la modélisation cybernétique ou, plus généralement, mathématique procède d'une innovation mathématique de type essentiellement formel et logique au sens large[4].

Teodorescu, en fait, est impressionné depuis longtemps par le travail de Rashevsky, mais sa pratique multidisciplinaire et tournée vers des résultats opérationnels l'invite plutôt à insister pour sa part non pas tant sur l'objectif théorique que sur l'intérêt heuristique indéniable de toute modélisation mathématique. Il ne manque pas ainsi de souligner avant tout l'importance de l'observation et de l'expérimentation concrète : dans la modélisation, la formalisation vient certes avant l'observation mais elle n'a pourtant pas la directivité et la rigidité d'une théorie, même si on peut la qualifier de « représentation théorique »[5]. De plus, que cette formalisation réussisse ou non à « représenter » le phénomène, elle peut toujours, en retour, servir à déceler des faits inaperçus lors de l'observation directe. En fait, dès 1953, de telles idées avaient déjà été exprimées en France et en français sous la plume de Louis Couffignal bien sûr mais aussi de Pierre de Latil[6], par

---

[1] [Balaceanu, C., 1971], p. 250. C'est l'auteur qui souligne. Notons que Balaceanu pense sincèrement que la « cybernétisation de la biologie » peut nous rapprocher de la connaissance de l'« essence de la vie », *ibid.*, p. 260.

[2] [Balaceanu, C., 1971], p. 260.

[3] [Balaceanu, C., 1971], p. 249.

[4] C'est-à-dire au sens de l'ensemble des catégories qui servent à *relier* des signes, à exprimer des *rapports*, des *interrelations*. Pour Balaceanu, la pensée cybernétique va jusqu'à constituer en ce sens un renouvellement épistémologique fondamental car elle permet de dépasser enfin le binarisme, la logique bivalente qui régnait en science et en philosophie depuis Chrysippe et Aristote au profit de logiques polyvalentes voire continues (« avec un nombre infini de position » : [Balaceanu, C., 1971], p. 255). C'est dans ce genre de passages, plus nettement philosophiques, que l'on comprend précisément comment a pu être acceptée et même adoptée la cybernétique dans des pays où le dialecticisme hégélien et marxien devait être mis à l'honneur contre toutes les logiques binaires.

[5] [Milcou, S. M., 1971], p. 236.

[6] Voir [Latil (de), P., 1953], p. 209 : « La méthode des modèles nous donne finalement deux sortes de vérités scientifiques qui peuvent se formuler ainsi : VERITE NEGATIVE : si un principe utilisé dans une expérience [sur un modèle] ne donne pas de résultats conformes aux phénomènes naturels, c'est que ce principe ne peut, à lui seul, expliquer ces phénomènes. VERITE POSITIVE : si un principe utilisé dans une expérience [sur un modèle] donne des résultats conformes aux phénomènes naturels, ce principe doit être retenu comme pouvant expliquer ces phénomènes.

exemple. Mais, en 1967, à Namur, Legay les voit exprimées et prises au sérieux par des biologistes et des médecins qui sont de surcroît de véritables expérimentateurs. Ce qui fait toute la différence : ils sont donc pour lui bien plus crédibles.

Ce texte de Teodorescu rencontre en Roumanie un écho très favorable chez des médecins, neurologistes et biophysiciens. Pendant ces années-là, dans l'esprit initié par Teodorescu, l'électronicien Edmond Nicolau, qui est, comme Teodorescu, membre fondateur de la Société de Mathématiques et de Physique de la République Populaire de Roumanie, travaille en collaboration avec le neurologiste Constantin Balaceanu sur des modèles biocybernétiques du névraxe (modèles de réseaux neuronaux au moyen d'automates analogiques, c'est-à-dire à logiques polyvalentes[1]). Dans ce travail de modélisation cybernétique du fonctionnement neurologique, certains médecins français (financés en général hors des institutions de la recherche publique) comme Jacques Sauvan[2] ou son collègue chirurgien et fondateur de l'« agressologie »[3] Henri Laborit (1914-1995) sont aussi particulièrement impliqués et ils sont présents à Namur, aux côtés de Legay, alors que bien peu d'agronomes ou de biologistes universitaires les accompagnent. Il faut comprendre que ce n'est pas un hasard si la modélisation biocybernétique n'éveille d'abord d'échos unanimes que dans la communauté des neurologues et des psychiatres : le postulat réducteur sur lequel elle se fonde est que l'on doit prendre acte du fait que le système que l'on modélise n'est qu'un *système informationnel*, un système échangeant des signaux. À l'époque, comme le rappelle Constantin Balaceanu, seuls quatre systèmes biologiques semblent pouvoir manifestement être traités sans dommage comme des systèmes informationnels : le système génétique, le système immunologique, le système endocrinien et le système nerveux[4]. Depuis le début des années 1950, comme le montrent abondamment les ouvrages de présentation générale[5] ou de vulgarisation, la cybernétique porte surtout à des réflexions concernant la « pensée artificielle » ainsi qu'en témoigne le titre du premier ouvrage en français d'introduction à la cybernétique, écrit par Pierre de Latil (1953). Il s'agit donc le plus souvent de neurocybernétique, c'est-à-dire de tentative de modélisation cybernétique du système nerveux.

De telles conquêtes, si minces qu'elles puissent paraître, si lentes qu'elles soient ne doivent pas être négligées. C'est dans ce cadre de la 'méthode des modèles' que les tortues électroniques [de Grey Walter] doivent être placées […] En somme : la réalité peut être plus complexe mais on doit admettre qu'elle peut être aussi simple. »

[1] Voir [Balaceanu, C., 1971], p. 255.

[2] Alors médecin attaché au Département de Cybernétique de la Société Nationale d'Etude et de Construction de Moteurs d'Avion (SNECMA). Dès le début des années 1950, Sauvan a travaillé avec Pierre de Latil (né en 1905) sur la modélisation cybernétique du système nerveux. Dès 1958, il avait présenté à Namur un système cybernétique qui simulait la création de l'instinct. Sur Sauvan, voir [Latil, (de), P., 1953], p. 296, [Sauvan, J., 1966], [Couffignal, L., 1963], pp. 9 et 108, enfin [Balaceanu, C., 1971], p. 257. Entre 1969 et 1976, aux côté de Henri Laborit, Jacques Attali, Edgar Morin, Michel Rocard, Henri Atlan, Jacques Robin, Robert Buron, René Passet, Joël de Rosnay, Michel Serres, André Leroi-Gourhan, et quelques autres, il a fait partie du « Groupe des Dix ». Ce groupe d'intellectuels et de scientifiques français a été formé au lendemain de la période mouvementée de 1968 pour construire une représentation systémique et intrégrative de l'économie et du monde humain dans son environnement, en prenant en compte la fondamentale complexité de leurs rapports. L'approche qu'ils cherchaient à constituer est à peu près assimilable à ce que Joël de Rosnay appellera plus tard le *Macroscope* ou ce que Jacques Attali baptisera la « socialisme relationnel ». Voir [Rosnay (de), J., 1975, 1998], *passim*, et [Attali, J., 1975], p. 236.

[3] Selon Laborit, science de l'ensemble des agressions externes et des réactions aux phénomènes de stress supportés par l'organisme en activité permanente de maintien de son équilibre interne (homéostasie). Laborit fonde la revue *Agressologie* en 1959. Henry Ey et A. Szent-Györgyi sont, entre autres, au Comité Scientifique de cette revue indépendante éditée par Laborit essentiellement au moyen d'aides financières fournies par des grands laboratoires pharmaceutiques français. Couffignal en est un des « correspondants ».

[4] [Balaceanu, C., 1971], p. 251.

[5] Voir le « Que sais-je ? » intitulé *Cybernétique et Biologie* publié en 1967 par une spécialiste de chimie quantique appliquée à l'ADN et à l'ARN, Andrée Goudot-Perrot : sur les 6 chapitres que compte cet ouvrage, cinq sont consacrés à la cybernétique de liaisons nerveuses. Le seul qui ne lui soit pas consacré porte sur la cybernétique de la cellule du point de vue du « code génétique » et de la « transmission de l'information génétique », [Goudot-Perrot, A., 1967], pp. 125-126. On n'y trouve donc aucun chapitre sur la biologie du développement, l'embryologie ou même la physiologie.

Or, comme le remarque alors Legay[1], tous les modèles que proposent ces biocybernéticiens concernent en fait des phénomènes asses simples, c'est-à-dire des phénomènes pour lesquels on peut isoler concrètement, ou en pensée, un système biologique et faire abstraction de certains facteurs y intervenant habituellement sans que le système ne change profondément de nature : ce sont des phénomènes pour lesquels on peut faire l'approximation du système fermé assimilable à un circuit à régulateur. En 1974, Henri Laborit résumera de façon suggestive ce présupposé de la méthode expérimentale telle qu'elle est implicitement conçue dans la vision cybernétique de la biologie :

« Quand on a compris ces principes fondamentaux [la présence dans tout organisme de niveaux d'organisation séparables répondant à une finalité fonctionnelle générale], on s'aperçoit immédiatement que l'expérimentation a pour méthode essentiellement d'observer un niveau d'organisation en supprimant la commande extérieure à lui. Elle ramène le servomécanisme au rang de régulateur. Elle ferme le système à un niveau d'organisation. L'enzymologiste et le biochimiste isolent les éléments d'une réaction enzymatique in vitro*, le biologiste isole des structures infra-cellulaires pour en étudier l'activité séparée de l'ensemble cellulaire auquel elles appartiennent, ou bien il étudie l'activité biochimique d'un tissu isolé. Le physiologiste isole un segment d'organe ou un organe pour en étudier le comportement ou focalise son attention sur un système, cardio-vasculaire ou nerveux par exemple, dont il étudie un critère d'activité privilégié. »*[2]

Or c'est bien ce postulat dont Legay s'aperçoit, à Namur, qu'il ne veut à aucun prix l'admettre pour les phénomènes qui l'intéressent. Pour lui, ceux qui affirment cela soit n'ont pas affaire aux mêmes objets d'étude soit ignorent complètement l'innovation épistémologique fondamentale qu'a apportée la méthode des plans d'expérience. Postuler que l'isolement du phénomène est toujours possible, c'est nier le caractère complexe des objets auxquels on a en général affaire. C'est dans le meilleur des cas en rester au niveau du « modèle général », c'est-à-dire au niveau du modèle théorique, sans avoir la possibilité de le spécifier davantage et donc de le confronter à l'expérience. C'est en rester souvent à un stade spéculatif. En cette fin des années 1960, Legay voit donc bien que, dès lors que l'on se pose des questions biologiques d'ordre plus physiologique ou même embryologique[3], ce qui est précisément son cas, l'invocation de schémas cybernétiques enchevêtrés, même si elle n'est pas entièrement fallacieuse sur le principe, ne conduit visiblement pas encore à la méthode mathématique miracle permettant de représenter simplement les phénomènes de croissance, par exemple, et d'embryogenèse. Car, dans de telles situations, il faudrait prendre en compte un nombre tellement grand de boucles de rétro-contrôle que le modèle serait inutilisable : il ne serait plus le support intellectuel maniable que l'on cherche. De plus, et c'est l'essentiel, l'hypothèse de l'isolement possible serait plus que douteuse.

De ses passages à Namur, Legay retient donc surtout ce que l'informaticien et épistémologue Edmond Nicolau y répète souvent, fidèle en cela à l'esprit de Teodorescu mais aussi au discours idéologique convenu du Parti des Travailleurs et de la Société de Mathématiques et de Physique de Roumanie : l'importance fondamentale de l'*interdisciplinarité* pour la construction de modèles mathématiques et le rôle essentiellement *heuristique* de ces

[1] Cette précision nous a été donnée par Legay lui-même, dans notre entretien, [Legay, J.-M. et Varenne, F., 2001], p. 11.
[2] [Laborit, H., 1974, 1995], p. 40 .
[3] Comme le philosophe Raymond Ruyer l'avait fait remarquer dès 1954 : « La foi aveugle [aux modèles cybernétiques], dès aujourd'hui, est nuisible, en d'autres provinces scientifiques [que la science et la technique des machines], par exemple en psychologie et en embryologie », [Ruyer, R., 1954], p. 24.

modèles. Legay est ainsi tout autant sensible au fait que Nicolau, dans une perspective épistémologique et politique plus large, prône un accroissement de l'humanisme dans les rapports entre science et société ainsi qu'une vision solidaire des relations entre les disciplines scientifiques à l'intérieur même de la science.

Le groupe « Méthodologie » de la DGRST : une rencontre avec l'écologie

Mais, entre-temps, à partir de 1969, Legay va être conduit à étendre toujours plus le spectre de ses objets scientifiques et à confirmer par là davantage encore l'idée d'une nécessaire coopération interdisciplinaire, au besoin contre les disciplines établies, surtout lorsqu'il s'agit de se pencher sur des objets complexes. Cette opportunité lui est donnée par sa nomination au groupe de travail « Méthodologie pour l'écologie » de la Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique. Comme Legay l'explique lui-même, il y entre au départ pour deux ou trois ans[1]. En fait il y restera bien plus longtemps. Sa fonction étant transversale, les responsables de la DGRST argueront notamment du fait qu'il n'est pas de parti pris et qu'il peut donc rester plus durablement. Et, en effet, la fonction que Legay et ses collègues doivent remplir consiste à examiner et à assurer le suivi d'un certain nombre des projets de recherche appliquée qui sont envoyés à la DGRST comme suite à divers appels d'offre en écologie, agronomie, géographie humaine. Dans cette situation, des financements publics sont à la clé. Et des problèmes concrets et, en général, assez urgents sont à résoudre en lien avec une demande sociale bien précise et exigeante. Legay participera ainsi à un certain nombre de programmes de recherche ciblés comme ceux qui concerneront la prévention de l'épidémie de Bilharziose en Guadeloupe, la gestion de la Mangrove (ou « mer boisée ») ou l'évolution de l'agriculture de montagne dans le Briançonnais[2], etc. Du point de vue qui est le leur, Legay et ses collègues sont vite amenés à soutenir par la suite les efforts de conception des chercheurs, d'abord en les mettant en contact les uns avec les autres, mais aussi et surtout en promouvant une méthode générale qui s'impose de plus en plus dans ces situations interdisciplinaires par excellence : la modélisation mathématique. De surcroît, dans ce contexte, Legay est amené à rencontrer la modélisation mathématique des processus écologiques au moyen de réseaux énergétiques (dits « réseaux » ou « structures trophiques »[3]), pratique en plein essor dans cette discipline depuis les années 1950[4]. Dans un article de 1959, l'écologue américain B. C. Patten avait par ailleurs rapidement mis en évidence le parallélisme entre l'analyse des systèmes, la modélisation cybernétique et les réseaux trophiques, eu égard au fait que les formalismes y représentent toujours des flux d'énergie ou d'information. En conséquence, chez un biologiste déjà informé de l'approche cybernétique, la réception des formalismes venant de l'écologie ne rencontre pas d'obstacle et vient plutôt apporter une confirmation de la valeur générale de l'analyse systémique[5].

C'est donc lorsque Legay occupe ce poste d'observateur privilégié et en même temps de pourvoyeur de méthodes qu'il se rend compte que les modèles se retrouvent nécessairement, d'une manière ou d'une autre, dans tous les projets interdisciplinaires qui ont été menés à bien

[1] Voir [Legay, J.-M. et Schmid, A.-F., 2002], p. 60.
[2] [Legay, J.-M. et Schmid, A.-F., 2002], p. 60.
[3] Voir [Odum, E. P., 1953, 1959], pp. 59-61.
[4] Voir [Deléage, J.-P., 1991, 1994], p. 136. Nous renvoyons au chapitre 6 de cet ouvrage pour ce qui concerne l'émergence de la modélisation mathématique fonctionnelle et énergétique en écologie.
[5] Rappelons que les idées de Eugene P. Odum sont assez représentatives de cette vision systémique positiviste. Selon lui, en effet, « un modèle est une formulation simplifiée qui imite les phénomènes du monde réel de telle sorte qu'il nous permet de comprendre des situations complexes et de faire des prévisions », [Odum, E. P., 1963, 1975], p. 8.

jusqu'ici. À partir de cette époque, l'interdisciplinarité va donc être étroitement liée à la pratique des modèles dans l'esprit de Legay[1]. Il va, à partir de ce moment-là, prôner dans *toute situation complexe* la « méthode des modèles ». C'est en ce début des années 1970 que Legay reprend cette expression aux cybernéticiens[2] mais dans un sens modifié comme nous l'avons déjà vu en partie. Car il sera encore amené à la rectifier en certains de ses aspects. Mais voici à peu près comment on pourrait tenter de résumer sa perception des choses à l'époque. Elle est intéressante en ce qu'elle ne reprend pas docilement la justification positiviste classique des tenants des modèles telle qu'elle s'est forgée dans l'esprit de l'analyse systémique :

1) Conformément à une conception humaniste et solidaire, le travail scientifique ne doit pas être conçu comme opposé au bien-être des travailleurs, car le désir de la société et le but de la science ne sont pas contradictoires en soi[3]. Ils peuvent fonctionner de concert si la société le décide en s'en donnant les moyens politiques (de par la solution marxiste vers laquelle certains textes de Legay font signe dans les années 1970).
2) En conséquence, les sciences elles-mêmes doivent manifester en leur sein une *solidarité*, c'est-à-dire une ouverture aux exigences des autres disciplines scientifiques : contre la vision comtienne des sciences, il ne doit y avoir ni hiérarchie ni séparation étanche[4] entre les disciplines.
3) De plus la science ne fait là que refléter la nature complexe des objets qu'elle étudie désormais. La science doit s'adapter aux objets non fragmentables puisqu'on les dénature si l'on tente de les traiter isolément, en partie ou parties par parties. C'est également à ce titre qu'elle ne doit pas être elle-même fragmentée.
4) Si bien que la seule méthode scientifique qui soit aujourd'hui véritablement transdisciplinaire, c'est-à-dire qui puisse encore définir l'unité de la science parce que restant valable dans toute discipline est celle qui, en même temps, permet le dialogue permanent entre les sciences ; c'est la « méthode des modèles ».

---

[1] « Je dois à la DGRST d'avoir compris sur le terrain que pluridisciplinarité et méthode des modèles étaient inséparables », [Legay, J.-M. et Schmid, A.-F., 2002], p. 60.

[2] Sauf oubli de notre part, nous situons sa première occurrence en français et dans son sens moderne (cybernétique) dans le titre d'un des chapitres de *La pensée artificielle* du cybernéticien Pierre de Latil : [Latil (de), P., 1953], pp. 207-227 : « La méthode des modèles ». Dans ce chapitre, ce n'est que l'approche cybernétique, que nous avons rappelée plus haut dans son contexte roumain, qui est désignée par cette expression.

[3] Voir les travaux de Legay sur ces questions dans le cadre de la Fédération Mondiale des Travailleurs Scientifiques, *in* [Legay, J.-M., 1981], pp. 59-71, en particulier, pp. 63-64 : « La science et la technologie sont maintenant considérées comme faisant partie intégrante du développement, pris comme un système. Elles en constituent des compartiments. Leur développement n'est pas une condition suffisante, mais est une condition nécessaire au développement économique et social ; sans la science et la technologie, les décisions et les desseins politiques ne sont plus que des actes de foi. » Il est significatif de voir que, dans ces conférences à destination des scientifiques communistes, Legay s'appuie sur une vision systémique des rapports science/société en allant même jusqu'à recourir à un terme qui, pour lui, ne peut être que lourd de signification : celui de « compartiment ». Une des méthodes d'analyse fonctionnelle des systèmes qu'il prise en effet le plus en ce début des années 1970 est la modélisation par compartiments, avec ce choix d'une vision nettement physiologique qu'elle impose.

[4] Pour la critique de la classification comtienne des sciences, voir [Legay, J.-M., 1981], p. 61. Bien entendu, sur ce point, Legay connaît et reprend la critique de Piaget mais il en accentue nettement le versant idéologique : « La pensée bourgeoise est monodisciplinaire. Héritage lointain de Descartes et d'un esprit analytique qui divisait les difficultés en autant de parties qu'il était nécessaire pour les résoudre séparément, elle a refusé la complexité des situations réelles et les interactions entre les parties ; elle a ignoré la notion de système aussi longtemps que possible ; elle en repousse maintenant les conséquences. L'administration universitaire, les grands corps de l'Etat s'accrochent désespérément à la classification d'A. Comte. » La pensé monodisciplinaire est donc assimilée à une pensée réactionnaire, attachée à de vieilles lunes, à ses privilèges matériels aussi, et qui reste susceptible de mystifier longtemps encore le grand public. De ce point de vue-là, Legay rejoint les épistémologues inspirés par Edgar Morin et le constructivisme, dont Jean-Louis Le Moigne. Voir [Le Moigne, J. L., 1995, 1999].

Nous avons présenté ici de façon résumée la cohérence de l'analyse de Legay en ce début des années 1970 parce qu'il se trouve que ce système de pensée, déjà en nette rupture avec la vision positiviste des modèles, va être fortement ébranlé par les réflexions contemporaines de ses collègues néo-marxistes venant de la philosophie. Nous allons voir que c'est en partie pour répondre aux critiques acerbes, anti-idéalistes, d'Althusser, de Badiou, de Fichant ou de Lecourt, toutes formulées plus ou moins directement contre la « méthode des modèles », que Legay sera amené à prolonger et à affiner encore son discours sur cette méthode pour la rendre également acceptable aux yeux d'un marxiste sincère. Car, en cette époque de bouillonnement méthodologique au sein de la DGRST, Legay lit tous ces philosophes assidûment. Il les cite constamment dans ses bibliographies. On ne peut donc faire l'impasse sur l'influence qu'ils ont dû avoir sur la formation de son épistémologie. Or, il y aura là pour lui un hiatus idéologique sévère. Et c'est précisément dans sa tentative de résoudre un tel hiatus que Legay sera conduit à rendre véritablement originale son épistémologie de la modélisation, dès lors qu'elle portera en elle les traces non seulement de cette volonté d'unification dont nous avons déjà rendu compte mais aussi d'un *compromis idéologique* majeur, selon nous, très révélateur de l'esprit épistémologique du temps et dont il nous faut désormais expliquer la genèse. Car comprendre comment Legay réussira finalement à contourner adroitement l'accusation d'idéalisme portée contre sa pratique quotidienne, c'est mieux comprendre comment la modélisation, en France, a pu finalement se développer en formant un relatif consensus et en évitant d'éveiller toujours les mêmes contestations, surtout dans un milieu et à une époque où la pensée de gauche est dominante. C'est comprendre en un sens l'incontestable réussite de Legay mais aussi les choix restrictifs qui ont inévitablement été les siens et qui pèseront plus tard sur l'avenir de la simulation informatique en France. Car l'épistémologie de Legay fera école en essaimant considérablement par la suite, tant au niveau de la promotion des méthodes à la DGRST qu'au niveau initial des formations de maîtrise (Certificat de Mathématiques Appliquées à la Biologie créé en 1974 à Lyon 1) et d'encadrement doctoral dispensés dans et autour de son laboratoire de biométrie de Lyon : des générations de docteurs y passeront et y seront formées dans cette perspective. Pendant longtemps, cette épistémologie des modèles coïncidera donc en grande partie avec l'épistémologie française des modèles en biologie.

Mais sur quoi porte donc cette critique quasi-unanime des philosophes néo-marxistes ? Pourquoi ne sont-ils pas à l'unisson de leurs collègues scientifiques roumains ? Est-ce une simple résurgence des critiques portées par les marxistes des années 1950 contre la cybernétique naissante au motif qu'elle allait asservir les hommes au lieu de les libérer ? Il ne semble pas. La critique est plus profonde en l'espèce, plus sévère, car elle est d'ordre épistémologique voire ontologique. Elle tend à Legay l'image grimaçante d'une science qui, avec ses modèles, est en complète dysharmonie avec le savoir vrai et sans fard qu'il espère voir se développer, solidaire en cela d'une société enfin humaine. Ce que ces philosophes stigmatisent va à l'encontre de l'idéal qu'il croit défendre. Il lui faudra donc réagir.

Une intervention de la philosophie française : l'accusation d'idéalisme

À la fin des années 1960, Althusser radicalise en effet l'épistémologie dialectique de Bachelard en réassumant sa critique des modèles mécaniques (1951) comme celle, déjà ancienne, des modèles cybernétiques formulée par Canguilhem (1963) mais en la transformant et en la déplaçant vers une critique philosophique et politique des modèles formels en général. Cette critique vise notamment les modèles qui sont récemment mis en œuvre dans les sciences

humaines, en particulier dans l'anthropologie de Lévi-Strauss. En 1967, dans ses cours de philosophie à destination des scientifiques de la rue d'Ulm, Althusser inscrit nettement ce combat contre la méthode des modèles dans la tradition déjà ouverte par Engels (dans l'*Anti-Dühring* - 1877) et reprise par Lénine (dans son « anti-Mach » : *Matérialisme et empiriocriticisme* - 1909) d'une lutte contre l'idéalisme en science. Ces cours auront un fort impact puisqu'ils circuleront assez largement mais d'abord sous forme ronéotypée avant d'être finalement publiés en 1974. Le but initial d'Althusser y est de contester le développement des sciences humaines structuralistes. Au passage, il critique fortement la « mode de l'interdisciplinarité »[1] en stigmatisant en elle la présence d'idéologies qui cherchent à s'asservir une partie de la science au nom de catégories philosophiques implicitement enracinées dans des idéologies pratiques, des conceptions du monde inavouées[2] : sont visées ici les conceptions « positivistes, néo-positivistes, structuralistes, formalistes, phénoménologiques, etc. »[3] qui toutes sont taxées de tendre à l'idéalisme. Toutefois, il considère que les disciplines scientifiques comme la physique mathématique, la chimie physique, la biophysique et la biochimie n'ont pas à être classées dans cette catégorie car elles manifestent en elles la présence de « rapports organiques » et internes entre disciplines scientifiques. Dans ces rapprochements entre disciplines, quant à eux respectables, il n'y a pas d'intervention philosophique extérieure : ces rapports « obéissent à des nécessités purement scientifiques »[4]. Car ces disciplines entretiennent entre elles des rapports de « constitution » réciproque et non de simple « application ». En l'espèce, avec ces disciplines frontières récemment confortées dans l'existence, il ne s'agit pas pour Althusser de cas d'échanges « interdisciplinaires » à proprement parler.

Fidèle à un spinozisme[5] dialectisé par sa lecture de Hegel, de Marx puis de Bachelard, Althusser intègre en fait sa lutte contre les modèles dans un combat plus vaste et sans cesse à reprendre, puisqu'étant toujours à l'œuvre au cœur de la science : celui du matérialisme contre l'idéalisme. C'est précisément dans cette dimension spécifiquement épistémologique que le matérialisme doit, selon lui, devenir dialectique. C'est aussi la raison pour laquelle la philosophie légitime, celle qui se réduit donc à la pensée et à la pratique de ce matérialisme dialectique, doit *intervenir* dans la science. Car, dans le progrès scientifique, dans l'esprit même des scientifiques, interfère continûment une « philosophie spontanée » qui va toujours dans la même direction : le refus du matérialisme et le retour de l'idéalisme sous des avatars chaque fois différents et qu'il faut donc chaque fois apprendre à débusquer. Autant être lucide pour Althusser : il y a des luttes philosophiques à l'intérieur même de la science. Là se justifie pleinement le rôle critique et d'intervention, cette fois-ci consciente, de la philosophie dans les sciences, selon Althusser. Ce travail est dialectique ; c'est-à-dire qu'il faut le reprendre mais aussi en renouveler la nature à

[1] [Althusser, L., 1967, 1974], p. 20.
[2] [Althusser, L., 1967, 1974], pp. 38, 45 et 46.
[3] [Althusser, L., 1967, 1974], p. 38.
[4] [Althusser, L., 1967, 1974], p. 33.
[5] Cette présentation est bien évidemment sommaire et schématique. Pourtant, lors de sa conférence sur « Lénine et la philosophie » de février 1968, en réponse à une question de Paul Ricœur sur la pertinence qu'il y aurait ou non à reconnaître des régions distinctes dans le savoir humain, Althusser répond « …il existe des continents, je ne dis pas du tout qu'ils ont des frontières fermées, absolument pas : *je suis spinoziste*, il existe une infinité d'attributs », [Althusser, L., 1968], p. 164. C'est nous qui soulignons. Althusser reconnaît par ailleurs que les philosophes ont aussi une P. S. P., une philosophie spontanée de philosophe, c'est, dit-il, leur « conception du monde », leurs idéologies pratiques [Althusser, L., 1967, 1974], p. 138. C'est pourquoi nous disons, pour simplifier, que sa P. S. P. est un spinozisme épistémologique et dialectique. Attention à comprendre que ce spinozisme n'est pas non plus un matérialisme métaphysique. Le matérialisme est une *thèse* qui n'a d'existence qu'en combattant la *thèse* adverse toujours fallacieuse et toujours renaissante : l'idéalisme. « La catégorie philosophique de matière, elle ne se touche jamais avec les doigts, elle n'existe pas matériellement, elle est une thèse qui *fonctionne* philosophiquement d'une certaine manière et le problème est d'étudier son fonctionnement *philosophique* », [Althusser, L., 1968], p. 166. C'est l'auteur qui souligne.

chaque génération. En faisant prendre un tournant épistémologique au matérialisme dialectique, Althusser se voit ensuite logiquement contraint d'en venir à une critique de la science actuelle, telle qu'elle fonctionne en cette fin des années 1960. Et c'est manifestement la méthode des modèles qui lui semble mériter les critiques les plus virulentes. Or voici en quels termes Althusser s'élève contre elle :

« Si on demandait [à ces physiciens et chimistes] de prendre alors la parole, il y a fort à parier qu'au petit groupe objet/théorie/méthode, ils substitueraient un autre petit groupe, beaucoup plus 'moderne', où il serait question de 'données de l'expérience', de 'modèles' et de 'techniques de validation', ou plus schématiquement : expérience/modèles/techniques […] Pour ne prendre que ce petit mot d'apparence innocent : 'expérience' (ou 'données de l'expérience'), il faut savoir qu'à la place qu'il occupe dans le second groupement, il a en fait chassé un autre mot : objet extérieur matériellement existant. C'est à cette fin qu'il a été mis au pouvoir par Kant contre le matérialisme et remis en place par la philosophie empiriocriticiste dont nous avons parlé. Quand on met ainsi l'expérience (qui est, notez-le bien tout autre chose que l'expérimentation) au premier rang, et quand on parle de modèles au lieu de théorie, on ne fait pas que changer deux mots : on provoque un glissement de sens, mieux, on recouvre un sens par un autre, et on fait disparaître le premier sens, matérialiste, sous le second, idéaliste. »[1]

Comme Bachelard, Althusser se dresse à nouveau contre le « modélisme » en insérant les avertissements de Lénine et de Canguilhem dans une philosophie générale consistant à décrire le développement de la science comme un processus de lutte dialectique incessante. À ce titre, la « méthode des modèles » serait le dernier avatar de l'indéfectible penchant de la science à idéaliser. Elle manifesterait au plus au point des relents de ce positivisme et de ce formalisme que le philosophe et historien des sciences Michel Fichant travaille par ailleurs à débusquer chez Duhem, à la même époque[2]. C'est donc d'abord parce qu'elle abandonne la notion d'« objet » pour lui préférer celle d'« expérience » ou de « données de l'expérience » que la méthode des modèles est idéaliste : symptôme qui en dit long sur le rôle disproportionné donné désormais au sujet connaissant et sur la contestation corrélative (finalement kantienne selon Althusser) et implicite de la thèse de l'existence du monde extérieur. C'est ensuite parce qu'elle substitue le terme de « modèle » à celui de « théorie ». Par là, l'« objectivité de la connaissance scientifique »[3] est remise en question ; entendons que les tenants des modèles refusent désormais de concevoir le projet de la science comme la recherche d'une correspondance au moins partielle entre un discours et une réalité qui existerait effectivement et extérieurement au sujet[4], et qui le transcenderait en ce sens. Dès lors, la tendance de la « méthode des modèles » est clairement idéaliste car le sujet s'autorise à *modeler l'objet à sa guise*. Ce sont enfin les « techniques de validation » que l'on substitue à la « méthode » : par là, on valorise au mieux le côté pédagogique de la science pour l'esprit humain, sa « vertu critique », mais non le caractère objectif de ses procédures. Dans ces trois glissements, les convictions de la philosophie spontanée des savants contemporains portent bien leur nom : elles tendent toutes à valoriser les pseudo-évidences immédiates. C'est en ce sens qu'elles sont « spontanées » pour Althusser et qu'elles fonctionnent

[1] [Althusser, L., 1967], p. 104.
[2] [Fichant, M. et Pécheux, M., 1969], p. 80 : « Nous vérifions encore que le positivisme et le formalisme de Duhem à l'égard de la théorie physique sont la contrepartie de sa métaphysique : il s'agit bien de délimiter les limites et les conditions du savoir scientifique pour le subordonner à un autre savoir. »
[3] [Althusser, L., 1967, 1974], p. 101.
[4] [Althusser, L., 1967, 1974], p. 101.

comme des images idéales donc comme un *idéalisme* : on croit qu'elles viennent de la science elle-même, alors que leur apparente spontanéité est bien plutôt le symptôme de leur élaboration seconde, externe, dans les catégories philosophiques ambiantes et dans les idéologies dominantes. Fidèle à l'esprit de Marx mais aussi de Bachelard (« il n'y a pas de vérités premières, il n'y a que des erreurs premières »), la philosophie d'Althusser est en ce sens une philosophie du soupçon, d'un soupçon porté sur les évidences épistémologiques premières et donc sur l'épistémologie des évidences premières, en l'occurrence sur l'épistémologie des modèles.

En 1969, dans *Le concept de modèle*, le philosophe Alain Badiou précise et prolonge cette critique marxiste en la fondant plus largement, ce qui est nouveau en France, sur les sources de la jeune théorie mathématique des modèles. Ainsi, tous les modèles des sciences expérimentales sont conçus *a posteriori* comme des interprétants sémantiques de classes de systèmes formels rigoureusement définissables axiomatiquement et syntaxiquement. Comme tout modèle, de par sa constitution, y compris le modèle mathématique de par le choix de son axiomatique particulière, insère du sémantique là où il ne devrait y avoir que du rationnel, c'est-à-dire du relationnel neutre, du syntaxique, il peut toujours être suspecté d'importer des idéologies au cœur du savoir scientifique. Tour à tour, les modèles économiques, linguistiques et cybernétiques sont accusés par Badiou de refléter les objectifs de la classe dominante, dont notamment l'idéologie du libéralisme. Badiou écrit ainsi : « Pour l'épistémologie des modèles, la science n'est pas un procès de transformation pratique du réel, mais la fabrication d'une image plausible. »[1] Or la fabrication de cette « image plausible » remplit toujours une fonction autre que scientifique. Elle est déterminée par des intérêts de classe. Badiou s'assigne alors la tâche d'épurer la science du mauvais usage des modèles. En écho aux mises en garde iconoclastes de Bachelard (1951) contre le modèle-image (par exemple le modèle de l'atome de Bohr), qui fascine et fige la recherche en un idéalisme (nous pourrions dire aussi *idolâtrie*) dangereux et stérilisant, Badiou pense que le modèle formel, notamment l'automate cybernétique, doit être traité comme un « adjuvant transitoire »[2], destiné à son propre démantèlement mais qu'il ne doit tout de même pas être éradiqué, étant donné sa valeur heuristique indéniable.

À la différence d'Althusser donc, Badiou ne rejette pas totalement l'usage des modèles mathématiques mais seulement l'idée que l'on présente la science comme une « connaissance par modèles »[3]. Les modèles ne doivent pas être les substituts de la théorie en ce sens-là, en ce sens figé, c'est-à-dire au sens d'une « figure idéale »[4] fascinante et toujours mystifiante. Badiou refuse en fait de considérer la science comme *theoria*, comme une théorie toujours contemplative et prétendument neutre. Pour lui, si l'on veut conserver un rôle central au modèle en lui refusant pourtant le rôle de substitut de la théorie, il faut penser que la science qui modélise n'a pas pour visée essentielle de construire des théories mais plutôt celle de parfaire ses expérimentations. Et c'est là la grande différence d'avec Althusser : pour Badiou, il faut aller jusqu'à penser que « toutes les sciences sont expérimentales »[5]. Si l'on veut adopter une vision authentiquement matérialiste et dialectique, il faut, selon lui, s'habituer à penser qu'un modèle n'est qu'une « articulation conceptuelle » rapportée à un « dispositif expérimental particulier : un système formel »[6] : « La

[1] [Badiou, A., 1969], p. 14.
[2] [Badiou, A., 1969], p. 17.
[3] [Badiou, A., 1969], p. 18.
[4] [Badiou, A., 1969], p. 17.
[5] [Badiou, A., 1969], p. 60.
[6] [Badiou, A., 1969], p. 60.

catégorie de modèle désignera ainsi la causalité rétroactive du formalisme sur sa propre histoire scientifique, histoire conjointe d'un objet et d'un usage. »[1] Badiou en conclut :

« Le problème n'est pas, ne peut pas être celui des rapports représentatifs du modèle et du concret [en sciences de la nature], ou du formel et des modèles [en mathématiques]. Le problème est celui de l'histoire de la formalisation. 'Modèle' désigne le réseau croisé des rétroactions et des anticipations qui tissent cette histoire …»[2]

Ainsi, finalement, avec Badiou, le modèle ne doit rien représenter. Le terme même ne désigne qu'un processus pratique, « un dispositif expérimental ». Il fait signe vers l'histoire des processus d'interactions pratiques entre des expérimentations et leurs transformations concrètes à travers un dispositif formel. Ce qui est formel, ce n'est donc pas une image, c'est un dispositif, soit un ensemble de règles d'ordonnancement et d'usage de ce qui est et reste toujours expérimentable. Pour conserver la catégorie de modèle et néanmoins faire droit à l'iconoclasme (ou anti-idéalisme) du matérialisme dialectique dont il se réclame à la suite d'Althusser, Badiou s'oriente ainsi vers une sorte d'opérationnalisme dialectique, historiciste, assez difficile à concevoir. La conception en est malaisée puisque le modèle ne semble justement pouvoir être dit et conçu que d'avoir été préalablement pratiqué[3]. La conception du modèle elle-même n'est pas représentable aisément.

Informatique et Biosphère **et la « Méthode des modèles »**

Comme on peut le comprendre, c'est surtout dans ce texte de Badiou (publié avant celui d'Althusser) que Legay trouve l'idée alternative permettant de lever le hiatus qui guette sinon son épistémologie. Car il sent que Badiou touche juste lorsqu'il lui indique, comme en passant, cette issue : s'attaquer à l'idée du modèle-représentation à laquelle croient encore inconsidérément ses collègues roumains, comme la majorité des praticiens des modèles. À partir de l'adoption et de l'explicitation de cette thèse, l'épistémologie des modèles de Legay atteint en effet sa complète maturité et sa forme définitive. Car, avec sa propre pratique et la perspective qui est la sienne, il n'est pas loin d'être d'accord avec cette insistance sur le caractère foncièrement expérimental de toute science. Il lui apparaît dès lors évident que la « méthode des modèles » renouvelle radicalement la méthode des sciences en leur ensemble, c'est-à-dire, en l'espèce, rien de moins que la « méthode expérimentale » telle qu'elle a été introduite par Bacon ou Galilée et confortée par Claude Bernard dans les sciences de la vie.

Il se trouve, qu'en 1973, Legay va avoir l'occasion de coucher sur le papier et de publier cette thèse innovante et désormais assez mûre. En effet, depuis 1971, aux côtés de son collègue du laboratoire de biométrie de Lyon, le biologiste des populations Jean-Dominique Lebreton, et avec un certain nombre d'autres collègues, notamment des médecins, des biométriciens, des écologues, des pédologues, des biopédologues, des phytosociologues, des géographes et des cartographes, il est membre d'une association internationale appelée *Informatique et Biosphère* dont le siège est à Paris, rue de Lille. Elle est dite « internationale » essentiellement parce qu'elle

[1] [Badiou, A., 1969], p. 67.
[2] [Badiou, A., 1969], pp. 67-68.
[3] C'est là rejoindre les idées contemporaines de Jean Toussaint-Desanti sur la nécessaire philosophie silencieuse que doit devenir la philosophie des sciences, et spécialement des mathématiques, du fait qu'elle doit s'éprouver dans le silence d'une pratique directe des concepts.

regroupe des chercheurs français de l'INRA, de l'ORSTOM ou du CNRS qui peuvent être en poste dans les DOM-TOM… Les colloques que cette association organisera pratiquement tous les ans, jusqu'à sa dissolution en 1981, pourront en effet avoir lieu en Afrique francophone, comme ce sera le cas en 1979, par exemple, avec le colloque d'Abidjan.

D'après ses statuts, cette association « a pour objet de promouvoir, coordonner, développer et diffuser les méthodes et les techniques de traitement de l'information dans les domaines de l'environnement, de l'aménagement du territoire, de la gestion globale et de la biosphère et de la protection de la nature »[1]. Elle promeut ainsi fortement et explicitement « l'approche multidisciplinaire ». À la manière dont les statuts la présentent, ce serait l'informatique qui permettrait désormais de réaliser immédiatement cette multidisciplinarité tant désirée. En particulier, l'association se propose « d'harmoniser les méthodes de collecte et de traitement des informations écologiques de façon à les rendre compatibles et à les mettre en commun par le moyen de banques de données »[2]. Or, parmi ses moyens d'actions, l'association prévoit la publication d'études régulières entreprises par l'association elle-même. Mais dans ces publications, il s'agira en fait souvent d'études méthodologiques financées quasi-exclusivement au départ par la DGRST et dont la publication n'aurait sans doute pas systématiquement été assurée par elle.

En 1973, Legay, qui, tout en travaillant pour la DGRST, enseigne depuis quelques années la méthode des modèles dans le cadre du certificat de MAB (Mathématiques Appliquées à la Biologie), voit là une occasion unique de publier « l'état actuel »[3] d'un cours aux accents déjà nettement épistémologiques. Mais il le fait sous la forme d'un manifeste qui ambitionne d'être à la fois plus et moins qu'un manuel pour étudiants : « En publiant ce travail, nous affirmons un point de vue, nous soutenons une thèse. »[4] Il s'agit là pour lui de présenter une thèse qui puisse répondre à la fois aux critiques formulées par des collègues scientifiques et à celles des philosophes que nous avons évoqués précédemment. Comme auparavant ses homologues anglo-saxons, Legay a en effet à faire face également à certaines critiques internes et déjà anciennes[5] quant à la « méthode des modèles » : elle serait un paravent qui cacherait la disparition de toute méthode scientifique unique, donc rigoureuse et claire. La dispersion, la perte de l'unicité des formalismes manifesterait la perte de la rigueur scientifique. Dans les années 1950-1960 et dans le contexte anglo-saxon, les réponses à ce genre de critiques tendaient habituellement[6] à prôner un raffermissement dans l'esprit des scientifiques d'un certain nominalisme ou positivisme au sujet de la valeur des formalismes : les modèles formels sont comme des noms, ils ne réfèrent pas à une idée qui existerait séparée, ils ne renvoient aucunement à une essence, ils ne sont donc pas à penser à l'image de théories essentialistes, ce sont des images certes, mais qui n'ont la valeur que de simples scénarios formels fictifs permettant le calcul ou l'action.

De son côté, même si Legay n'est pas entièrement convaincu par le projet d'apparence prometteur qui est à l'origine de l'association, les publications d'*Informatique et Biosphère* représente donc pour lui l'occasion de faire entendre publiquement un autre point de vue qui ne trouve pas encore de tribune pour s'exprimer en dehors de sa pratique de conseil au sein de la DGRST. C'est là la source de ce chapitre du livre de 1973, *La méthode des modèles, état actuel de la méthode expérimentale*. Il deviendra ensuite une référence pour un grand nombre de ceux

[1] Voir [Legay, J.-M., 1973b], p. 149.
[2] [Legay, J.-M., 1973b], p. 149.
[3] [Legay, J.-M., 1973a], p. 7.
[4] [Legay, J.-M., 1973a], p. 7.
[5] Voir [Slobodkin, L. B., 1958].
[6] Voir, par exemple, [Skellam, J. G., 1971].

qui se réclameront, en France, de la « méthode des modèles », notamment en écologie et en agronomie. Nous n'allons pas en reprendre dans le détail le contenu car nous en avons décrit la genèse partielle lors des années qui ont précédé. Mais comme il complète les premières formulations de Legay et qu'il constitue un point d'orgue dans la constitution de l'épistémologie des modèles en France, nous allons former ci-dessous un tableau-bilan des principales idées regroupées et mises en ordre par Legay en cette occasion. Ce dernier en jugera la forme suffisamment mature et aboutie pour décider d'utiliser encore des pans entiers de ce travail de 1973 dans son livre grand public de 1997, *L'expérience et le modèle*.

Mais avant d'en venir au contenu de ce travail, il est à signaler que Legay s'appuie considérablement sur un article de 1966 du médecin et biocybernéticien Jacques Sauvan, rencontré auparavant à Namur. Cet article, assez confidentiel, avait paru dans la revue *Agressologie* de Laborit sous le titre « Méthode des modèles et connaissance analogique ». Il se présente comme assez clair et complet, mais il est écrit dans une perspective quasi-exclusivement cybernétique. C'est donc bien lui qui incite Legay à employer désormais l'expression de « méthode des modèles ». Cette expression vient bien au départ de la seule pratique cybernétique de la modélisation. Par un effet de contamination et surtout du fait de cette volonté de fédérer les diverses approches en une méthode scientifique unique, Legay va l'étendre rétrospectivement et rétroactivement aux deux autres sources de modélisation mathématique en biologie. C'est un indice qui, à soi seul, montre combien Legay cherche et parvient à intégrer subtilement la vision cybernétique, la tradition biophysique et sa propre tradition fishérienne pour les faire consoner autour de sa thèse définitive. Comme nous le verrons, cette thèse du modèle-outil présentera de surcroît l'immense avantage de ne plus se prêter aux critiques des scientifiques hostiles ou des intellectuels néo-marxistes et de correspondre ainsi à certaines normes politiques et morales du temps. Mais voici en substance la forme quasi terminale de cette épistémologie :

1) L'expérience n'est pas première car il n'y a pas de rencontre directe avec la réalité. L'expérience est au contraire le résultat d'un « processus d'observation et de réflexion »[1]. Le modèle intervient sur les données « avant l'expérience »[2] et pour mener à elle. En fait, l'expérience est une « fonction »[3], non une image. C'est « l'ensemble d'un couple entrée-sortie »[4] provoqué sur un individu.
2) L'individu sur lequel on expérimente est lui-même défini comme un « système », comme un « ensemble d'éléments unis par des relations d'interdépendance »[5]. Il est défini par sa structure de relations, non par sa nature.
3) « Les expériences actuelles sont complexes. »[6] C'est-à-dire (et là Legay reprend la définition de Sauvan[7]) que « la fonction du tout et les fonctions des parties n'ont en commun qu'une intersection »[8]. Pour traiter la complexité des objets, et conformément à

[1] [Legay, J.-M., 1973a], p. 11.
[2] [Legay, J.-M., 1973a], p. 11.
[3] [Legay, J.-M., 1973a], p. 16.
[4] [Legay, J.-M., 1973a], p. 16.
[5] [Legay, J.-M., 1973a], p. 11.
[6] [Legay, J.-M., 1973a], p. 18.
[7] [Sauvan, J., 1966], p. 16 : « L'effet de système a un autre aspect, celui-là bien connu depuis Claude Bernard, c'est que la fonction du 'tout' n'est pas une simple addition des fonctions des parties, mais qu'elle réalise une fonction supplémentaire 'émergente'. » Plus tard, Legay modifiera cette définition de la complexité car il se méfiera de cette notion d'émergence. Le système sera dit complexe lorsque le fait de lui retirer une partie le conduit à changer de nature.
[8] [Legay, J.-M., 1973a], p. 19.

l'enseignement de Fisher, « nous devons nous habituer à cet espace expérimental pluridimensionnel »[1].

4) La thèse du modèle-outil non représentatif est affirmée pour la première fois : « Le modèle n'est pas la réalité, il est l'instrument d'étude de la réalité. Même quand cet instrument consiste en une simulation de la réalité, il ne doit à aucun moment être confondu avec la réalité. Il y a d'ailleurs là une impossibilité logique. Si un modèle représentait totalement la réalité, il ne saurait s'en distinguer et il n'y aurait plus sujet ni recherche définis. »[2]
5) Enfin en tant qu'outil, le modèle doit être finalisé, c'est-à-dire qu'il ne doit pas prétendre répondre à plusieurs demandes : il est conçu en fonction d'un *objectif* précis. On ne doit pas chercher à construire un modèle général au sens où un tel modèle prétendrait se substituer à la réalité dans les questions que l'on pourrait lui adresser selon plusieurs perspectives : le modèle doit rester toujours partiel et perspectiviste.

Ce résumé appelle deux remarques. Tout d'abord, pour définir le cadre d'emploi de la nouvelle méthode expérimentale, Legay adopte au départ une conception clairement inspirée de la cybernétique et de l'analyse des systèmes. C'est surtout le cas pour la définition du « système » expérimenté, c'est-à-dire pour ce qui fait l'*objet* de l'expérience. Mais l'« expérience » elle-même, en revanche, est plutôt définie en référence avec la pratique fishérienne d'interprétation des données à *travers un modèle*. C'est pourquoi elle est conçue comme le fruit d'un travail et non comme une intuition première et non travaillée (influence de Bachelard et des néo-marxistes). C'est donc en particulier ici que Legay noue les fils respectifs des deux traditions de modélisation statistique et systémique. De plus, le modèle résultant d'un vrai travail de conception est à penser comme un « dispositif formel » de transformation des données, au sens de Badiou, mais non comme une image. Or, il est intéressant de noter que ce refus du modèle-image donne à l'auteur l'occasion de déployer un contexte de justification tout à fait surprenant, à première vue :

« C'est peut-être le plus grand service que l'on puisse rendre aux hommes d'aujourd'hui que de leur faire admettre le complexité de la réalité (y compris dans les domaines économiques et politiques). Se battre pour comprendre ou pour créer des structures plus complexes, c'est se battre pour un progrès mental. Dénoncer le modèle-image-de-la-réalité même auprès de ceux qui ont conscience qu'il s'agit d'une image simplifiée de la réalité, c'est dénoncer un concept primitif et idéaliste, c'est en même temps dénoncer un concept mécaniste. »[3]

Ce passage, très curieux du fait de cette envolée un peu déplacée dans un ouvrage de méthodologie scientifique, nous indique bien sans ambiguïté que les critiques des néo-marxistes ont été entendues, assimilées et reprises en partie[4]. Legay y transforme continûment l'argument politique et philosophique en un argument épistémologique mais aussi ontologique : il faut rejeter le modèle-image au nom de la complexité de la réalité. En fait, il est essentiel de comprendre que l'appel à la reconnaissance de l'*objectivité* du monde extérieur tel qu'il avait été exprimé par

[1] [Legay, J.-M., 1973a], p. 19.
[2] Cet argument logique et classique se retrouve dès le *Cratyle* de Platon dans lequel Socrate défend un cratylisme modéré.
[3] [Legay, J.-M., 1973a], p. 26.
[4] À titre de confirmation, notons que la bibliographie très riche de ce chapitre de livre contient tous les auteurs et les ouvrages dont nous avons parlé : Bachelard, Lénine, Althusser, Badiou, Fichant et Lecourt. Il n'y a, par ailleurs, aucun ouvrage d'épistémologie anglo-saxonne.

Althusser a été transformé en un appel à la reconnaissance de sa *complexité*. Le contexte de justification, de philosophique qu'il était, devient plus méthodologique et donc plus recevable dans un contexte purement scientifique. Dans les deux cas, il s'agit d'en appeler à la reconnaissance d'une transcendance insurmontable de l'objet à l'égard du sujet, donc d'en appeler à la lutte contre l'idéalisme ou tout autre forme d'idolâtrie. Ainsi le modèle peut survivre et même prospérer en tant qu'outil mais seulement et pour peu qu'il porte toujours en lui les stigmates de son insuffisance à dire le tout de la réalité. Un certain spinozisme s'exprime là aussi en ce que la réalité immanente est dotée de l'attribut ordinairement divin de l'insondabilité. L'interdit classique de la représentation du divin semble alors assez logiquement s'imposer pour la « réalité », objet de science. Mais ce passage montre que cette « logique » est en fait surtout le fruit d'une décision et d'une invocation morale et politique : elle dépend donc bien aussi d'une représentation du monde propre à l'après-guerre, d'un esprit du temps. Il s'agit de fuir à jamais les idoles, toujours porteuses de simplisme, en retournant au travail du monde au cœur du monde lui-même.

Comme naguère le prônait l'*Imitation de Jésus-Christ* de Thomas a Kempis pour l'accession à la piété et au salut, le travail scientifique doit consister à imiter l'éminence de la nature (sa complexité) par les *actes* réfléchis et personnels (l'interdisciplinarité et le modélisme perspectiviste et pragmatique) qu'on lui oppose et non par des contemplations figées ou par des images qui menacent toujours de nous plonger dans l'idolâtrie irrespectueuse. Dans ce contexte, comme dans celui des ordres mendiants puis des mouvements pré-réformistes dont on sait qu'ils se développèrent en partie pour compenser le déracinement du rapport sensible des fidèles au réel et à Dieu, tel qu'il fut occasionné par l'urbanisation croissante au bas Moyen-Âge[1], devant le semblable déracinement que vivent les scientifiques, l'emphase est portée non plus sur la théorie collective et unitaire, mais sur la *praxis* individuelle, seule chargée d'incarner la présence réelle de l'esprit de connaissance dans la nature, dans cette nature certes entre-temps désenchantée, mais d'autant plus étrange et transcendante. Que ce soit dans les doctrines théologiques qui ont préparé la Réforme ou dans l'épistémologie dialecticiste des modèles de la nature vivante, il s'agit bien toujours de réagir à un déracinement, non en y résistant, mais en l'assumant pieusement par le passage de la contemplation à l'action[2]. Sans vouloir nous aventurer davantage ici dans l'étude de filiations intellectuelles lointaines, indiquons seulement que ce sont de tels parallélismes qui autorisent à voir découler en quelque manière la lutte épistémologique contemporaine contre l'idéalisme, de la constante lutte religieuse contre les idoles, cela du fait même d'un glissement corrélatif de l'ontologie vers un spinozisme plus ou moins explicite, c'est-à-dire vers une divinisation de la nature[3].

Conséquence de cette épistémologie pour la simulation sur ordinateur

Qu'en est-il dès lors de la simulation sur ordinateur ? Va-t-on autoriser l'idée qu'elle puisse servir à représenter la réalité ? Ou va-t-on confirmer l'intuition programmatique d'*Informatique et Biosphère* selon laquelle l'informatique sert essentiellement à stocker, à traiter et à faire circuler des informations ? L'ordinateur n'est-il qu'une machine à traiter de l'information ? Y a-t-il des expériences sur ordinateur ?

---

[1] Voir [Chaunu, P., 1975, 1984, 1994], Tome I, pp. 254-260 et [Le Goff, J., 1977, 1984], pp. 105-108.
[2] Sur la fréquente dérive de tout iconoclasme vers une survalorisation de l'action, voir [Mondzain, M. J., 1996], p. 98.
[3] Pour une justification plus approfondie de cette hypothèse d'une sécularisation de l'iconoclasme judéo-chrétien dans l'épistémologie contemporaine, voir notre annexe B.

Sur ce point, Legay répond clairement dans une note de bas de page : « Une simulation ne peut être considérée comme une expérience, tout au moins au sens de recours à la réalité. »[1] Il ne peut donc y avoir d'expérience sur ordinateur. Cependant, on sent ici que Legay voit immédiatement poindre l'objection des simulations cybernétiques et il se rend compte qu'il ne faut peut-être pas ranger la simulation dans la même catégorie que le modèle révélateur d'expérience : « mais la simulation n'est pas qu'une technique de production de phénomènes ; simuler n'est pas seulement 'faire ce qui est avant l'expérience', c'est aussi étudier des mécanismes possibles sur des faits réels. »[2] La simulation serait donc une activité plus proprement théorique et, à ce titre, elle ne concernerait pas directement le renouveau de la méthode expérimentale par les modèles dont il est pourtant principalement question dans ce texte de 1973. Elle serait une technique heuristique de recherche de mécanismes explicatifs. Mais pourquoi dès lors parler de la simulation ? Legay ne lève pas l'embarras dans lequel il nous place à ce sujet. Car il va tout de même continuer à placer les simulateurs dans la catégorie des modèles. En fait, là encore, il adopte intégralement la classification cybernétique de Sauvan[3] en décidant d'admettre que les simulateurs sont bien des modèles mais qu'ils ne le sont que par les seules performances apparentes[4]. Plus loin, reprenant la distinction faite par Couffignal[5], dans un esprit également cybernétique, entre modèle physique (matériel) et modèle dialectique (appartenant à l'ordre d'un langage naturel ou formel), Legay évoque l'existence non pas d'ordinateur[6] mais de « calculateur digital ». Or, du point de vue de la modélisation, une telle machine semble ne pas être facilement classable selon les critères de Couffignal : c'est un modèle physique mais à opérateur logique car, « pour programmer une machine digitale, il faut déjà connaître l'algorithme qui mène à la solution du problème envisagé »[7]. Le langage y intervient donc de manière fondamentale ! Là aussi, la classification cybernétique à la manière de Couffignal semble échouer à clarifier réellement les choses : le programme informatique étant une sorte de physicalisation d'un modèle dialectique, une telle classification, trop grossière, ne devrait déjà plus tenir. Mais Legay s'efforce pourtant d'appuyer son argumentation sur elle.

En résumé, de même que la simulation n'est toujours conçue que dans un cadre cybernétique et théorique, la machine digitale se voit, pour sa part, cantonnée au rôle de calculateur, puis de transformateur et de classificateur de données en conformité avec l'orientation et la conviction des fondateurs d'*Informatique et Biosphère* et en continuité avec la perspective prioritairement informationnelle de la pratique fishérienne de la biométrie. Dans ce contexte précis de l'épistémologie de la modélisation mathématique, on constate donc une fois de plus que l'*épistémè* informationnelle a rencontré une relative unanimité et a pesé de tout son poids dans les réflexions méthodologiques comme dans les orientations scientifiques des années d'après-guerre[8].

Ajoutons que ce cantonnement au sujet du rôle de l'ordinateur sera longtemps relayé et même amplifié, notamment par les pouvoirs publics en France, durant toute la décennie de 1970. Et, de ce point de vue là, l'association *Informatique et Biosphère* n'est pas la seule à restreindre *a priori* les usages de l'informatique dans les sciences. Les scientifiques français, surtout dans les

[1] [Legay, J.-M., 1973a], p. 26.
[2] [Legay, J.-M., 1973a], p. 26.
[3] [Sauvan, J., 1966], p. 10.
[4] [Legay, J.-M., 1973a], pp. 28-29.
[5] [Couffignal, L., 1963], pp. 107-108.
[6] Sans doute aussi parce que le mot « ordinateur » est alors déposé par la société IBM depuis mai 1954. Nous devons cette remarque à Girolamo Ramunni.
[7] [Legay, J.-M., 1973a], p. 31.
[8] Nous renvoyons au travail de Jérôme Segal sur la question (2003).

sciences humaines, sont alors nombreux à faire le pari d'une informatisation précoce et généralisée, au sens d'une fluidification des échanges informationnels, ignorant ou oubliant promptement les autres usages (en particulier la simulation) de l'ordinateur. Pour s'en convaincre, il suffit de consulter les documents contributifs annexés au rapport de Simon Nora et Alain Minc sur *L'informatisation de la société française* conçu et publié en 1979 sur une demande remontant à 1976 et faite par le Président de la République de l'époque, Valéry Giscard d'Estaing : les histoires de l'informatique qu'on y trouve sont toutes orientées vers l'avènement d'une société où l'ordinateur servira de support pour un grand système informationnel. À aucun moment il n'y est question d'applications autres qu'informationnelles, même pour la recherche scientifique[1].

La ramification du gui : un modèle pour l'épistémologie des modèles

Pendant ces mêmes années au cours desquelles Legay travaille à concevoir une épistémologie des modèles à la fois fédératrice et capable de répondre aux critiques de ses détracteurs, y compris de ceux qui appartiennent à la communauté des scientifiques, il poursuit également la conception de modèles morphologiques et de croissance pour l'œuf du ver à soie. En 1971, avec Robert Pernet, un collègue pharmacologue, il publie chez *Acta biotheoretica* un modèle mathématique de cet œuf. Le modèle est descriptif. Sa nature est purement géométrique. Grâce à des mesures réitérées et nombreuses effectuées au micromètre optique, Legay a en effet constaté la remarquable stabilité des proportions longueur/largeur et longueur/épaisseur de cet œuf. Il lui paraît donc possible d'en construire un modèle simple. Mais l'inconvénient de ce modèle de structure est qu'il ne vaut que pour l'œuf terminé : il ne permet aucunement de schématiser les processus conduisant à la structure finale. Comme la perspective de Legay reste avant tout explicative, au moins au niveau physiologique, il ne réutilisera donc plus ce modèle dans ses travaux futurs. Ce dernier restera une simple suggestion de description.

À la même époque, et pendant quelque temps encore, Legay ne perd pas de vue l'approche générale et en revanche déjà passablement explicative des processus de croissance que trois ans auparavant il avait mis en place pour l'article publié dans la revue de Rashevsky. Toujours en vue de clarifier et expliquer en partie les phénomènes de croissance en terme de reproduction cellulaire, et conformément à l'esprit d'un expérimentateur aguerri, il entreprend de se pencher sur des « processus de reproduction » dont on peut déjà mesurer expérimentalement et donc évaluer quantitativement les caractéristiques précises de reproduction entre générations : à savoir les processus de ramification tels qu'ils se manifestent de façon éclatante et mesurable chez les *plantes*. D'une certaine manière, mieux que tout autre phénomène vivant, une plante montre manifestement et maintient en permanence sous nos yeux toute l'histoire des « processus de reproduction » qui lui ont donné le jour. La « distance » temporelle s'y laisse lire et donc mesurer comme une « distance » spatiale. Elle est donc l'objet d'étude à privilégier dans un premier temps, si l'on veut tenter de spécifier le modèle général de croissance par reproductions de générations. Pour ces mêmes raisons de simplicité de procédure en vue du calibrage du

[1] Voir la bibliographie sur la recherche et « Les aspects techniques de l'informatisation » réalisée sous la supervision de Mme Isabelle Félix, *in* [Nora, S. et Minc, A., 1978], volume d'annexes n°3, pp. 189-198. On y trouve les têtes de paragraphes suivantes : « a- Mini et micro-ordinateurs, b –Transmission de données, réseaux d'ordinateurs, télé-informatique, c- Bases de données, d- Recherche ». Le dernier paragraphe contient en tout et pour tout une seule référence à un article du CCRI (Comité consultatif pour la recherche en informatique) et prônant une politique de la recherche en informatique en France. Il a été publié en 1975 dans les Dossiers de la Recherche, La Documentation Française, n°1. L'accent est donc porté sur une conception de l'informatique comme dispositif technique et automatisé de traitement et de circulation des données.

modèle de croissance, Legay choisit une plante dont la morphologie est, dit-il, particulièrement « simple »[1] : le gui. En 1970, un de ses étudiants, G. Cordier, a déjà travaillé avec lui à constituer un ensemble de mesures susceptibles de servir à la constitution d'un modèle de ramification précis pour cette plante. Dans ce cadre, Legay a été conduit à proposer un nouveau modèle de ramification qui l'oblige en fait à prendre nettement ses distances avec sa propre proposition générale de 1968. Ainsi ce travail sur le gui, au départ prometteur, manifeste plutôt la très faible applicabilité de son « modèle général » populationnel. Il contribue donc plutôt à renforcer en son esprit l'épistémologie instrumentaliste des modèles alors en pleine constitution. En 1971, Legay profite donc de l'occasion qui lui est donnée de publier de nouveau dans la revue de Rashevsky non pas pour prouver expérimentalement la pertinence de son modèle de 1968 (il ne le peut pas au vu de ses résultats empiriques) mais pour exprimer et démontrer dans un contexte scientifique précis son épistémologie désormais bien formée. À ce titre, le demi-échec de Legay dans cette question des modèles de croissance lui servira plutôt à confirmer aux yeux de ses collègues une épistémologie anti-représentationnaliste et instrumentaliste. Cet article de 1971 est donc intéressant et révélateur en ce qu'il ne limite pas à la publication d'un modèle partiel de ramification mais en ce qu'il présente un exemple d'usage des modèles sur lequel peut se saisir la pertinence de son épistémologie des modèles. Si bien que, du point de vue de Legay, ce modèle du gui est aussi un modèle pour l'épistémologie des modèles. Cet échec relatif lui apparaît fécond. Car le cas de la modélisation de la croissance des plantes se présente finalement à lui comme une pierre d'achoppement exemplaire pour toute entreprise de modélisation à visée représentationnelle. Il est pour lui l'occasion de confirmer une épistémologie des modèles qui, comme nous l'avons vu, dépasse par ailleurs ce seul cadre de la modélisation des plantes. Mais, comme le cas particulier de la modélisation de la croissance des plantes semblait *a priori* le plus favorable à l'approche théorique et représentationnelle, le fait qu'il fasse finalement échouer son projet d'une modélisation générale des phénomènes de croissance au regard des mesures et des tests statistiques vaut comme un argument *a fortiori* : si même les processus de reproduction les plus apparemment simples et manifestes, ceux de la ramification végétale, ne sont pas modélisables de façon univoque, il devrait en être *a fortiori* de même pour tous les autres « processus de reproduction ». C'est sans doute pourquoi Legay s'autorise à produire là de nombreuses remarques épistémologiques allant dans le sens de sa propre conception, désormais mature, des modèles et de leur usage. Et c'est pour cette raison même qu'il nous est crucial de revenir sur les résultats et arguments invoqués dans cet article d'autant plus que, par la suite, et ce n'est pas un hasard, il servira explicitement à l'agronome du CIRAD de Reffye à mettre en valeur sa propre approche par simulation et ce par contraste en quelque sorte avec l'approche et l'épistémologie de Legay.

Dans ce travail de 1971, Legay se propose dans un premier temps de confronter au test statistique le modèle général de ramification proposé par Rashevsky dès 1948 dans son ouvrage *Mathematical Biophysics*. Il s'agit d'un modèle reposant sur l'hypothèse que les contraintes métaboliques sont déterminantes dans la genèse d'une ramification végétale. On s'en souvient, elle consiste à admettre que le flux métabolique F dans un rameau de rayon r est proportionnel à la section de ce rameau :

$$F = K r^2$$

[1] [Legay, J.-M., 1971], p. 388.

Legay montre alors que l'on peut en déduire ce qu'il appelle un « modèle de Rashevsky généralisé » en supposant que cette hypothèse est valable à chaque rang de ramification. Il suffit pour cela de considérer que le flux métabolique total se conserve. Si au rang 1 on a n_1 rameaux de rayon r_1, dans chaque rameau, on a un flux métabolique égal à F/ n_1 auquel on peut par ailleurs appliquer la même hypothèse de modélisation :

$$F/ n_1 = K r_1^2$$

Dès lors le modèle se déporte sur la relation entre les rayons des rameaux successifs :

$$r_i^2 = n_{i+1} r_{i+1}^2$$

Legay précise que cette relation est simple et que c'est pour cette raison même qu'elle est « vérifiable »[1]. Le « contrôle expérimental »[2] est effectué sur 27 échantillons de gui prélevés sur divers arbres hôtes. Il est mené au moyen d'un test statistique de type χ^2 et il conduit à rejeter massivement le modèle métabolique généralisé.

C'est à partir de ce rejet de l'hypothèse purement métabolique que Legay se propose d'introduire un modèle populationnel qui soit prioritairement sensible au *nombre* de ramifications à chaque rang. Or, c'est précisément cela qu'il appelait, en 1968, l'« ordre » de la « relation de reproduction »[3]. Même s'il ne le présente pas explicitement ainsi, son objectif est donc d'essayer de voir si son modèle cellulaire à perspective populationnelle et générationnelle ne vaudrait pas mieux que celui de Rashevsky. En fait, les mesures effectuées sur le gui lui montrent que les ramifications ne sont pas toujours de même « ordre » : elles ne sont pas toujours binaires (seulement à 67 %) et les mesures statistiques montrent que le nombre de rameaux dépend de façon significative à la fois de l'espèce de l'arbre hôte et du rang de ramification du rameau porteur. Legay en conclut que « l'hypothèse d'une ramification binaire serait donc assez grossière »[4]. Or, même s'il ne le précise pas de nouveau ici, une grande partie de l'intérêt de son « modèle général » des relations de reproductions de 1968 reposait sur la possibilité de calculer analytiquement le *nombre de rameaux* à chaque génération *à condition* que certaines hypothèses supplémentaires, comme la constance de l'« ordre » de ramification, c'est-à-dire du nombre de rameaux, soient valables. Il lui faut donc rejeter l'idée que l'on puisse utiliser son étude théorique préalable. Pour des raisons de non-calculabilité cette fois-ci, son « modèle général de reproduction » fondé sur une perspective populationnelle ne se trouve pas plus utilisable que le modèle métabolique généralisé de Rashevsky. Sur cet exemple précis, nous voyons donc bien que c'est en recourant à de telles analyses biométriques de terrain que Legay se persuade que ce genre d'hypothèse de calcul *a priori* est en général intenable. Devant ces résultats empiriques, Legay est conduit une fois de plus à se confirmer dans l'idée que les modèles généraux calculables sont de ceux qui ne sont pas précisément calibrables au moyen d'une étude biométrique. Ces modèles lui paraissent servir au mieux à indiquer de nouvelles variabilités, autrement inaperçues.

[1] [Legay, J.-M., 1971], p. 388.
[2] Selon les termes mêmes de Legay, [Legay, J.-M., 1971], p. 388.
[3] À distinguer donc de l'ordre de ramification.
[4] [Legay, J.-M., 1971], p. 391.

Toutefois, devant le cas du gui, Legay ne renonce pas encore tout à fait à recourir à une approche populationnelle. Il opte ainsi pour le test d'un « nouveau modèle »[1] qui lui est suggéré par un calcul simple effectué à partir des tableaux de mesures[2] disponibles, le calcul du *volume total* des rameaux engendrés à chaque génération. Legay constate sur les données biométriques que ce volume est relativement constant en moyenne. Il en induit donc une nouvelle hypothèse théorique : « La quantité de matière vivante qu'un organisme comme le gui est capable de synthétiser dans un temps donné est approximativement une constante. »[3] Comme son « modèle général » de reproduction de 1968, cette hypothèse de modélisation de 1970-1971 concerne le niveau d'interprétation physiologique de la croissance. Cette approche ne va certes plus considérer la *population des branches* mais plutôt la quantité de matière vivante, c'est-à-dire en quelque sorte *la population des cellules* engendrées à chaque laps de temps : comme dans le cas de la première proposition de 1968, « il s'agit d'une hypothèse qui se place davantage au niveau de la physiologie cellulaire (capacité de multiplication) qu'à celui des contraintes mécaniques et métaboliques comme le faisait le modèle de Rashevsky »[4]. Legay étudie alors systématiquement le rapport du volume des rameaux de rang i sur la somme des volumes des rameaux de rang i+1. Il procède ensuite à un test de signification de type t de Student sur la loi des variations de ce rapport autour de la valeur théorique de 1 ; et il obtient un tableau où les différences obtenues sur les divers échantillons sont la plupart du temps non significatives. Ce modèle se révèle donc meilleur que celui de Rashevsky et que son propre « modèle général » de 1968. Mais il oblige à faire la distinction entre la *croissance en extension* correspondant au phénomène de ramification proprement dit (population des branches) et la *croissance en densité* « qui se traduit par un phénomène d'homothétie appliqué à chaque élément du système »[5] (population des cellules). Donc tous les points de vue ne peuvent être adoptés en même temps si l'on veut disposer d'un modèle précis.

Bilan : la non existence du modèle unique

Legay en conclut que cette enquête qui l'a mené du modèle de Rashevsky au modèle du volume moyen des rameaux a nécessité le passage d'une approche morphologique à une analyse des processus physiologiques de croissance qui conduisent à cette morphologie : son « nouveau modèle » peut en effet être interprété comme un modèle explicatif de croissance et pas seulement comme un modèle de morphologie. Ce modèle lui-même n'est pas exempt de défaut et il se révèle approximatif à l'analyse. Pour Legay, c'est bien le signe que si l'on veut disposer de modèles à la fois calculables et calibrables sur des données de terrain, il faut préciser à quoi ces données peuvent être utilisées et ainsi restreindre *a priori* ses prétentions et ses objectifs d'intervention. Il faut tout d'abord adopter une « base » interprétative bien distincte, qu'elle soit métabolique comme dans le cas de Rashevsky ou bien physiologique comme dans son propre cas. Aucune base d'approche n'est en soi préférable à une autre : tout dépend de l'objectif visé. Voici alors dans

[1] « Il est intéressant de remarquer que les volumes restent relativement constants en moyenne, tout au moins pour les niveaux où l'effectif est suffisamment important. Cette observation nous a conduit à imaginer un nouveau modèle », [Legay, J.-M., 1971], p. 394.
[2] Dont Legay ne nous dit jamais s'ils sont traités par ordinateur, ce que l'on peut supposer au vu de la quantité de nombres impliqués.
[3] [Legay, J.-M., 1971], p. 394.
[4] [Legay, J.-M., 1971], p. 395.
[5] [Legay, J.-M., 1971], p. 399.

quels termes Legay indique la leçon épistémologique qui doit être finalement retenue de ce genre de demi-succès ou demi-échec :

« L'intérêt d'une telle étude est pour moi d'être un exemple du fonctionnement d'un modèle mathématique en tant qu'instrument intellectuel de recherche[1]*. Le problème n'est pas bien entendu de savoir si le modèle de Rashevsky est meilleur que le mien. À mon avis ce genre de question est sans fondement. Un modèle, s'il est un bon outil, doit nous permettre de découvrir des faits nouveaux. Le modèle de Rashevsky nous a permis d'amorcer l'exploration de la structure d'une plante comme le gui ; notre modèle, construit sur d'autres bases, a permis de saisir d'autres aspects de la réalité […] En résumé nous voyons qu'il n'est pas possible d'envisager un* seul modèle *pour l'étude du phénomène de ramification. Malgré l'apparente simplicité morphologique du résultat, ce phénomène met en cause d'innombrables mécanismes dont nous constatons seulement à première vue un bilan global […] Devant la multiplicité des problèmes soulevés, on voit bien qu'aucun modèle ne peut* rendre compte *de la réalité. Ni les relations (1) ou (2) [du modèle de Rashevsky], ni (7) ou (9) [du modèle de Legay], ni d'autres ne peuvent décrire la réalité biologique dans toute sa complexité. On notera cependant l'efficacité de relations* aussi simples *dans l'exploration de cette réalité. En outre, elles nous suggèrent des expériences nouvelles ; elles font progresser nos connaissances dans des directions qui ne sont pas quelconques et qui correspondent précisément aux aspects envisagés par ces modèles.*

Ceux-ci sont des instruments finalisés de notre recherche. »[2]

C'est donc par ces mots on ne peut plus clairs que se termine l'article de 1971 sur le modèle de ramification du gui. Nous citons longuement ce passage car il montre qu'entre 1968 et 1971, la maturation contemporaine de l'épistémologie de Legay se ressent explicitement jusque dans ses publications scientifiques elles-mêmes. Il n'est pas indifférent pour notre problématique de constater que, dans un esprit biométrique attaché de surcroît, à la suite de Teissier et Grassé, au niveau physiologique des phénomènes vivants, la modélisation de la ramification et de la croissance des plantes constitue comme une pierre d'achoppement exemplaire pour tout projet scientifique qui tenterait de concevoir encore la modélisation comme une représentation, c'est-à-dire ici comme une reproduction du phénomène naturel dans toute sa complexité. Pour Legay, dans ces années-là, la problématique morphologique et morphogénétique constitue un cas exemplaire de résistance à la modélisation représentationnelle. Or, nous aurons l'occasion de voir comment l'approche par simulation a en un sens contourné ces interdictions programmatiques (qui se présentaient comme des innovations épistémologiques et idéologiques) sur le matériel même à partir duquel Legay avait bâti sa démonstration qu'il voulait si générale : la morphogenèse des plantes.

[1] On retrouve ici l'idée développée notamment par l'école roumaine de cybernétique.
[2] [Legay, J.-M., 1971], p. 400.

CONCLUSION : Multiplication et dispersion des formalismes

Finalement, ce qui caractérise cette deuxième époque, qui va donc de l'émergence de l'ordinateur au tout début des années 1970, c'est un ensemble de traits que nous sommes désormais à même de dégager. Tout d'abord, la simulation numérique de la morphogenèse y apparaît très tôt mais de manière polymorphe : en fonction des auteurs, ce sont différentes pierres d'achoppement qui sont à chaque fois retirées du chemin de la modélisation de la morphogenèse végétale. Chaque simulation étend le pouvoir du formalisme selon une ou deux dimensions jusque là inaccessibles, guère plus. Aucune simulation à elle seule ne peut aller jusqu'à toucher l'empirie pour promettre une calibration effective. Toutes ces simulations restent donc autant de modèles théoriques, qualitatifs, et seulement suggestifs, au même titre que les modèles mathématiques qui leur sont contemporains et qui prétendent toujours expliquer, que ce soit ceux de la biophysique, de la biotopologie, de la biologie relationnelle, de la topologie différentielle ou de la thermodynamique des structures végétales. Dans ce cadre, l'ordinateur est un simulateur d'allure. Il reproduit des formes qui font penser à des formes naturelles. La ressemblance n'est que vague et reste purement qualitative. Du côté des formalisations théoriques ou spéculatives, qu'il s'agisse des modèles ou des simulations, la dispersion que nous annoncions est donc bien la règle. Mais c'est la dispersion de pures intentions, de spéculations et de gestes mathématiques sans guère de prise sur le monde des plantes.

Quant à la modélisation de terrain, celle qui a une prise sur le réel, la dispersion et la diversité sont justement sa méthode, son *credo*. Fille d'un temps où les idéologies semblent devoir s'effriter, où l'on a le sentiment d'avoir appris que le monde naturel comme le monde humain est complexe, et que leurs interactions le sont de fait encore plus, la « méthode des modèles » permet de ne pas se faire des idées et de se promettre de travailler le monde selon ce nouvel esprit de liberté, âpre, mais tellement responsabilisant, de l'après-guerre. Pour des suivis de production, pour des plans d'expériences multifactorielles, pour des améliorations de conduites culturales, pour des problématiques de gestion de fléau, les modèles biométriques et pragmatiques fonctionnent. Ils sont conçus pour cela. Et pourtant, ils achoppent sur des suivis de morphogenèse à l'échelle de la plante individuelle. Tout au moins, ils n'échouent pas tout à fait : ils font voir là plus que jamais le caractère désormais inéluctablement perspectiviste et sélectif du modèle mathématique. C'est que tout ne peut y être formalisé en même temps. Et ce qui pourrait apparaître ici comme un défaut du modèle, on décide de l'interpréter comme une qualité de la nature, comme la preuve que l'on a bien à faire à elle, à son insondabilité comme à son infinie complexité.

Ces modèles pragmatiques sont sélectifs dans leur perspective. Ils sont de surcroît mutuellement exclusifs : rien de plus normal, pense-t-on, que cette dialectique, que cette contradiction de la représentation et de l'action. L'ontologie dialectique, spécifiquement à l'œuvre chez les biologistes, déplace l'infinité de la transcendance perdue vers l'infinité des dimensions de l'opération praxique de l'homme sur le monde, de l'homme sur lui-même, œuvrant à même le monde. Quant aux modèles théoriques, quand on est de ceux qui s'y consacrent, on en déteste la diversité tout en contribuant à l'augmenter néanmoins. Ainsi cherche-t-on à les rendre non pas exclusifs mais plutôt mutuellement absorbants. Les formalismes de la biologie théorique cherchent ainsi à se réduire les uns aux autres dans le secret espoir qu'il n'en reste plus qu'un seul à la longue. Dans ces œuvres de résistance à la dispersion, la recherche d'une monoformalisation est

le substitut de la recherche d'un enracinement. D'un côté donc, une assomption tranquille de l'inconsistance des modèles pour peu qu'ils promettent et promeuvent l'action humaine, de l'autre un refus inquiet de cette dispersion car elle annonce une insignifiance, une perte de sens face au monde, en particulier pour ceux que l'ontologie dialectique, le positivisme ou le nominalisme indisposent.

Pour tous cependant, la nature n'est plus écrite en langage mathématique. Mais pour tous aussi, de par sa certaine transcendance, elle est devenue l'équivalent du Dieu révélé de la Bible de naguère. En recherche d'unité, les biologistes théoriciens lui appliquent encore la matrice biblique et monarchique d'avant toute réforme, au risque de tomber dans l'idolâtrie. De leur côté, refusant l'hégémonie d'une représentation figée par l'institution d'un formalisme unique, les biologistes pragmatistes se croient plus habiles car émancipés de ce risque. Ils optent pour une attitude aux consonances passablement franciscaines ou calvinistes : comme ils ne croient plus guère à l'autorité ni au privilège d'un enracinement unique des formalismes dans les choses, il s'agit pour eux de briser l'institution unique du formalisme mathématique comme on a, autrefois, relativisé ou brisé l'Eglise. En fait, sur la nature elle-même, ils appliquent non plus la « matrice biblique », d'un seul livre, d'une seule formulation et d'un seul discours, mais ils appliquent encore ce que le philosophe contemporain Robert Damien appelle la « matrice bibliothécaire » : celle de tous les livres et de tous les discours possibles. Ils rejoignent ainsi sur le plan épistémologique la longue liste des déplacements antérieurs des représentations judéo-chrétiennes face aux déracinements et à la dispersion des discours humains portés sur la nature divine[1]. Voilà donc le tableau à la fois spirituel et ontologique d'une époque qui, pour diverses autres raisons aussi (mutation des demandes sociales à l'égard de la science dans l'après-guerre, limitation des capacités des instruments et des formalismes, choix idéologiques) se construit, avec une relative cohérence, une épistémologie consensuelle de la dispersion des représentations.

Quant à l'avenir prochain de cette situation dans le domaine précis de la modélisation de la forme des plantes, on peut déjà en déceler une orientation dans le souci croissant et tout de même assez partagé d'une plus grande fidélité aux détails de l'organisme. Ainsi, il est à signaler que la pensée populationnelle dans laquelle Legay avait été élevé, et dont on a vu qu'il l'avait lui-même judicieusement appliquée à la morphogenèse, ne sera pas pour rien dans l'inflexion qui se produira par ailleurs vers les pratiques de simulation au cours de la décennie de 1970. Le choix d'adopter peu ou prou une telle approche populationnelle et/ou cellulaire pour traiter des phénomènes de croissance rencontrera en effet d'autres adeptes à la même époque, notamment à partir du travail de certains botanistes. Mais, comme nous allons le voir tout de suite, et là sera toute l'immense différence avec le travail de Legay, ils insisteront en priorité sur le côté cellulaire et non sur le côté populationnel : ils attendront avant d'en passer à une approche populationnelle au sens strict. C'est-à-dire qu'ils ne procéderont pas d'abord par analyses et dénombrements statistiques, selon la recherche de comportements moyens. Ils se pencheront davantage et plus longuement sur les comportements individuels et différenciés des cellules ou des organes élémentaires de manière à voir si une modélisation mathématique de leur multiplication à la fois constructive, calculable et calibrable n'en serait pas possible à cette échelle. C'est qu'une croissance d'un organisme pluricellulaire n'est pas assimilable à une multiplication d'unicellulaires : de par la différenciation cellulaire, l'hétérogénéité y est la règle. Il faut aller au-delà du premier travail d'Eden. Et dans cette direction-là, l'ordinateur n'a pas encore dit son dernier mot.

[1] Voir [Damien, R., 1995], pp. 310-312.

TROISIEME EPOQUE : LA CONVERGENCE

INTRODUCTION – De la diversité des convergences à l'unité d'une méthode

Après six longues années de silence, les travaux de simulation d'Eden vont susciter une première réponse du côté de la biologie. Comme nous le verrons, c'est un biologiste théoricien, au départ biophysicien moléculaire, qui va considérer un à un les rameaux d'une plante ramifiée et les faire simuler graphiquement sur le même ordinateur qu'Eden, et selon une procédure stochastique semblable à celle que ce dernier utilisait dès 1959. Mais un tel transfert nécessitera des amendements très instructifs. Ce sera la première collaboration effective entre un ingénieur électronicien (et statisticien) et un biologiste des plantes autour d'une machine graphique programmable et d'une méthode de simulation. Nous tâcherons de comprendre comment cette première convergence et ce premier transfert de méthodes et de concepts ont pu avoir lieu, ce qui les a déterminés et les suites qu'ils ont connues.

Par ailleurs, et comme on peut s'y attendre, ce sont des problématiques de biologie moléculaire qui vont, les premières en biologie, susciter l'idée de procéder par la modélisation des cellules individuelles dans leurs comportements différenciés. Dès lors, assez vite, et dans un tout autre esprit que celui d'Eden, certains botanistes tenteront d'emboîter le pas à ces « simulations moléculaires », en tâchant de procéder à des simulations de plantes que l'on pourrait dire également « cellulaires » à leur échelle. Ce sera la période de la modélisation logiciste ou algorithmique des algues qui mènera à quelques essais de simulations graphiques sur ordinateur.

Enfin, un peu plus tard, ces premières convergences avec le substrat biologique, encore locales, assez formelles et non opérationnelles, sembleront elles-mêmes se précipiter, converger puis cristalliser autour d'une méthode de modélisation par simulation sur ordinateur qui conduira, quant à elle, à la mise au point du premier outil opérationnel, dès 1979. Avec cette dernière convergence, la simulation des plantes individuelles, dans leur forme et leur croissance, aura alors définitivement quitté la spéculation. Elle sera vraiment descendue sur le terrain des sciences et techniques de la vie et de l'environnement. En conséquence, fidèle à notre projet d'enquêter sur les effets techniques et épistémologiques de l'ordinateur dans la modélisation récente de la forme des plantes, comme dans le statut de ses formalismes, nous concentrerons un moment notre attention sur le contexte politique et institutionnel qui a vu naître cette option tout à la fois conceptuelle et instrumentale. Une telle focalisation mettra en lumière le rôle pionnier d'un laboratoire français du CIRAD. Les autres approches n'y seront certes pas oubliées. Mais nous leur donnerons un rôle moindre que précédemment car elles n'ont pas manifesté de changements profonds, en tout cas internes, dans les deux décennies qui ont suivi. Elles ont longtemps joué le rôle de simples alternatives spéculatives avant de s'agréger pour certaines, très récemment, à cette méthode française de simulation, pour devenir, elles aussi, opérationnelles sur le terrain.

Il est un dernier point majeur à accentuer : cette convergence dernière sera polymorphe. Elle conservera la diversité des approches, mais autour d'un même outil logiciel. Elle n'aura donc pas la nature des convergences absorbantes antérieures que l'on a connues en biologie théorique et qui procédaient par l'assimilation de formalismes les uns aux autres, mais plutôt celle d'une convergence agrégeante et concrétisante. Comment cela a-t-il été historiquement possible ? Quel glissement cela a-t-il supposé pour la méthode des modèles et pour son épistémologie ? Telles seront les dernières questions que nous poserons à l'histoire récente en ce domaine.

Suivons donc d'abord l'émergence des premières simulations à vocation de réalisme. Elles sont d'inspiration géométrique et probabiliste pour les unes, logiciste pour les autres, mixte pour les troisièmes. Voyons en quoi elles rompront fondamentalement avec les usages purement informationnels ou communicationnels de l'ordinateur comme avec l'épistémologie pragmatique ou praxique du modèle perspectiviste. Ces simulations menées à bien par des biologistes sont les premières à s'être rapprochées du terrain. Elles ne seront pas les dernières. En même temps que cette série de jonctions avec l'empirie, on verra s'ouvrir une époque de convergences de multiples natures. Mais encore faudra-t-il pour cela qu'une problématique agronomique sonde les limites de l'habituelle modélisation statistique et qu'elle s'empare de la simulation pour la faire servir à des desseins pragmatiques. Encore faudra-t-il aussi qu'elle s'approprie conjointement une avancée récente dans les concepts de la botanique qui servent à la classification systématique des architectures de plantes. Toutes choses contingentes qui demandent un contexte, des institutions, des personnes mais aussi des rencontres de hasard dont il nous faudra restituer et comprendre l'entrelacs. Alors seulement, la simulation pourra sembler devenir progressivement une plate-forme intégratrice de modèles dispersés comme elle semblera aussi, et de plus en plus, favoriser la convergence entre disciplines elles-mêmes, et entre problématiques naguère cloisonnées. Tel nous apparaîtra le mouvement d'ensemble de cette troisième époque de l'histoire récente de la modélisation de la croissance et de la forme des plantes : un mouvement de convergences multiples.

CHAPITRE 16 – Simulation probabiliste de formes biologiques ramifiées : Dan Cohen (1967)

Avec le travail du biologiste israélien Dan Cohen, on assiste à la première appropriation de la simulation discrétisée et sur ordinateur par la biologie. Toutefois, avec Cohen, cette appropriation est encore le fait d'un certain versant théorique de la biologie. Au-delà de la représentation déjà assez réaliste de la ramification végétale, ce qui intéresse Cohen, c'est avant tout la possibilité de mettre en forme un argument de nature théorique et générale sur les processus de morphogenèse. En ce qui concerne sa trajectoire professionnelle, Cohen, comme la plupart des acteurs dans cette histoire de l'émergence de la simulation, a eu un parcours interdisciplinaire. De manière assez peu commune, il est en effet passé de la physiologie et de la biochimie des plantes à la modélisation de leur croissance puis, plus récemment, à des questions d'écologie évolutionnaire.

Dan Cohen s'était en effet formé auparavant dans le domaine de la physiologie des plantes. Dans un contexte de biophysique moléculaire, il avait d'abord travaillé avec le professeur Benzion Ginzburg sur les transports d'ions dans les membranes cellulaires. Sa thèse, soutenue à Oxford en 1960[1], portait spécifiquement sur l'existence de liaisons entre des ions Rb+ (rubidium) et des cellules de *Chlorella*. Il y montrait que le rayon de l'ion jouait un rôle déterminant dans ces liaisons. Mais, à cette époque, ce genre de recherche le laisse sur sa faim. Il avoue être bien plus attiré par des travaux sur le fonctionnement et l'évolution de l'organisme conçu comme un tout[2]. Très vite après sa thèse, il réoriente donc ses centres d'intérêts en conséquence. C'est à ce moment-là qu'il prend la mesure de l'importance de la modélisation mathématique pour la caractérisation des processus biologiques complexes et évolutifs. Au début des années 1960, le linguiste et logicien Y. Bar-Hillel (1915-1975), alors célèbre collègue et collaborateur de Carnap[3], lui conseille de s'intéresser à la cybernétique et, pour compléter sa formation, de rejoindre un temps le laboratoire que Heinz von Foerster a fondé en 1958[4] à l'Université de l'Illinois, le BCL (*Biological Computer Laboratory*)[5]. Ce laboratoire fonctionne en effet beaucoup à partir de collaborations et d'invitations de ce type. C'est une manière pour von Foerster de continuer à faire vivre le projet cybernétique, certes entre-temps modifié par l'importance qu'il avait accordé au rôle du bruit comme créateur d'ordre et à l'auto-organisation qui en résulte[6]. Pendant l'année 1964, Dan Cohen y occupe donc le poste de chercheur associé auprès de Heinz von Foerster. Aux dires de Cohen lui-même, von Foerster l'aurait « aidé à définir les problèmes de base et les processus de l'utilisation optimale de l'information dans un environnement incertain »[7]. C'est bien en tout cas cette notion d'usage optimal de l'information biologique en milieu incertain qui définira le cadre

[1] Pour ces indications biographiques, voir [Cohen, D., 2000].
[2] [Cohen, D., 2000], p. 2.
[3] En 1955, Bar-Hillel et Carnap s'étaient notamment illustrés en critiquant les abus du recours à la notion vague d'information qui avaient déjà été commis en leur temps, notamment pour exprimer des problèmes de nature sémantique et pour permettre ainsi aux sciences humaines d'enrôler cette notion fourre-tout avec son outillage mathématique. Pour un récit circonstancié et critique de cette épisode, voir [Segal, J., 1998], chapitre 11.
[4] Voir [Müller, A., 2000], p. 3.
[5] Pour une histoire de ce laboratoire, voir [Segal, J., 1998], chapitre 7, [Müller, A., 2000] et [Goujon, P., 1994a].
[6] Albert Müller rend compte de cette stratégie dans son « histoire du BCL » [Müller, A., 2000], p. 4.
[7] "Heinz helped me to define the basic problems and processes of the optimal use of information in uncertain environments", [Cohen, D., 2000], p. 1.

futur de ses recherches en écologie évolutionnaire[1]. À partir de ce moment-là, Dan Cohen prend l'habitude systématique de s'entourer de mathématiciens plus aguerris à la manipulation des modèles mathématiques, comme plus tard ses collègues Simon Levin de Cornell puis Princeton, et Yoh Iwasa de l'université de Kyushu au Japon.

En 1967, son désir de formation interdisciplinaire et de collaboration le retrouve encore aux États-Unis, mais cette fois-ci au RLE (*Research Laboratory of Electronics*) du MIT. C'est là qu'il rejoint Murray Eden. Même si nous n'avons pas de document attestant de ce lien, nous pouvons supposer qu'une fois encore, Bar-Hillel, bénéficiant de ses liens constants et privilégiés avec les linguistes du « département des langues modernes » du MIT, dont Morris Halle lui-même, a introduit Dan Cohen aux travaux communs de Halle et Eden et l'a ensuite appuyé pour venir dans cette structure du MIT. Un biologiste n'aurait peut-être pas spontanément découvert[2] les publications d'Eden. Comme cela a été précédemment évoqué, en 1967, Dan Cohen reprend alors en partie le même modèle que Murray Eden, mais en bénéficiant cette fois-ci des crédits du Joint Services Electronics, de la *US National Science Foundation*, de la NASA mais aussi des *National Institutes of Health*[3].

Une enquête de faisabilité sur ordinateur

Pendant, ces années 1966-1967, Cohen travaille donc avec Eden, dans le même laboratoire que lui, et bénéficie également de la technologie du calculateur TX-2. À la différence d'Eden cependant, Cohen est un biologiste et sa problématique reste biologique : il demeure attaché au département de botanique de l'Université Hébraïque de Jérusalem. De son point de vue, il perçoit l'intérêt théorique des premiers travaux de Murray Eden pour la biologie mais il envisage de les améliorer en s'efforçant de retrouver certains concepts propres à la morphologie botanique et à l'embryologie de l'époque, notamment celle de Conrad Hal Waddington. La question précise que se pose Cohen est en effet celle de savoir s'il est possible de tester théoriquement l'hypothèse waddingtonienne d'une morphogenèse conçue comme le fruit d'un « ensemble hiérarchiquement ordonné d'interactions entre des gènes, des produits de gènes et l'environnement extérieur »[4]. Cohen fait ici allusion à la notion de « paysage épigénétique » que Waddington avait introduite en 1957 dans son *The strategy of the genes*[5] en adaptant à l'échelle de l'ontogenèse la notion antérieure de « paysage adaptatif » de Sewall Wright (1932).

L'intérêt de Cohen est donc de valider un argument théorique à valeur très générale : ce faisant, il commence à relier ainsi ses propres questions d'écologie évolutionnaire à cette problématique morphogénétique de l'épigenèse telle que Waddington l'avait précédemment réintroduite en embryologie. Sans volonté de calibrer précisément son modèle de morphogenèse

---

[1] Voir sa bibliographie *in* [Cohen, D., 2000], pp. 3-5.

[2] Il est toutefois également probable qu'en étant en poste au BCL, Cohen ait eu lui-même entre les mains les actes du quatrième symposium de Berkeley sur les mathématiques statistiques et les probabilités. C'est dans ces actes, publiés en 1960, que l'on trouve l'article d'Eden sur la croissance des formes.

[3] Voir [Cohen, D., 1967], p. 248.

[4] "Several lines of evidence suggest that the overall pattern of differentiation and morphogenesis in living organisms is produced by a hierarchically ordered set of interactions between genes, gene products and the external environment", [Cohen, D., 1967], p. 246.

[5] Il suggérait de reprendre l'approche du généticien Sewall Wright telle que ce dernier l'avait proposée dans son célèbre article sur l'évolution dans des populations mendéliennes de 1931. Wright s'opposait alors à l'approche de R. A. Fisher. Pour une restitution fine du débat et des idées de Wright en particulier, voir [Gayon, J., 1992], pp. 350-367. De même que Wright montrait la possibilité d'« émergences » à l'intérieur de populations (même si ce terme le gênait de par son côté mystique : voir [Wright, S., 1931], p. 154), Waddington suggéra que les caractères, dans le phénotype, procèdent d'un mécanisme similaire d'« émergence ». L'expression « paysage adaptatif » ne fut proposée par Wright qu'en 1932.

sur des cas réels, il veut montrer une faisabilité à un niveau très général : la faisabilité pour les êtres vivants d'une croissance et d'un développement évolutifs et adaptatifs sans besoin de recourir à des lois d'une complexité excessive, cette complexité étant exprimée chez lui en terme d'« information ». Selon lui, si on arrivait à écrire un programme informatique « minimal » mettant en œuvre des règles de génération « les plus simples possibles »[1] pour des formes ramifiées déjà assez réalistes globalement et qualitativement (à l'œil), on pourrait considérer qu'on a accru la plausibilité de l'hypothèse épigénétique de Waddington et donc, avec elle, les postulats analogues de l'écologie évolutionnaire, si l'on peut traiter, en première approximation, le monde organique à l'image d'un organisme unique. Ce qui serait faire retour vers la notion voisine de Sewall Wright.

Des classes d'éléments hiérarchiquement organisés et sensibles à l'environnement

Il s'agit donc bien de faire dessiner une structure ramifiée par un calculateur connecté à une table traçante. Cohen reprend alors l'approche probabiliste d'Eden pour la branchaison. Mais, pour bien faire apparaître l'utilité, d'un point de vue de biologie théorique, de ce qu'Eden appelait l'apparition d'une « dissymétrie », il propose de prendre en compte ce qui s'appelle, en embryologie organiciste, un « champ de densité » morphogénétique. C'est notamment dans cette substitution terminologique que se situe la clé du transfert de la simulation de l'analyse combinatoire vers la morphologie biologique, chez Cohen. Cette notion de « champ » avait précédemment été introduite en embryologie en 1932 par J. S. Huxley[2]. Prenant lui-même déjà modèle sur la notion physique de champ, Huxley avait ainsi voulu généraliser la notion de gradient (dont on se souvient qu'elle est due originellement à C. M. Child, 1916) en ne privilégiant plus une direction axiale précise[3]. Elle avait été ensuite reprise par Waddington pour expliquer des phénomènes embryologiques apparentés à ce principe, déjà ancien en botanique, de la pousse dans le plus grand espace libre.

Or, et ce point est d'importance, si Cohen veut rendre compte de ce champ avec la technique simulatoire d'Eden, il ne peut se contenter de sa grille de cellules carrées. Il considère donc le plan *géométrique* muni d'une résolution spatiale, pourrait-on dire, plus petite. Il prend ainsi en compte les 36 points qui avoisinent le point initial de la croissance ou de la branchaison éventuelle et qui sont écartés chacun d'un angle de 10° (car 36*10° = 360°). Chacun de ces 36 points directionnels se voit affecté d'un « champ de densité » qui est calculé à partir des distances de ce point aux autres éléments de l'arbre en construction[4]. Ces 36 points pondérés désignent alors ensemble une direction de pousse préférentielle variable pour chaque départ de pousse potentielle[5]. Après la forte discrétisation d'Eden, Cohen se voit donc significativement dans l'obligation de re-géométriser l'espace de la morphogenèse biologique. Cette re-géométrisation de l'espace signifie que Cohen ne voit pas comment faire dessiner une plante suffisamment réaliste dans sa forme s'il s'en tient à une approche cellulaire grossière : il resserre les mailles du réseau et il retient donc surtout la formalisation probabiliste.

La longueur et l'angle de la croissance qui s'effectue à partir du point initial sont en effet déterminés par le champ de densité. Les règles de branchaison, elles aussi, sont sensibles à ce champ de densité, mais, surtout, elles sont probabilistes. Leur probabilité est exprimée en fonction

[1] [Cohen, D., 1967], p. 246.
[2] Voir le chapitre de R. Kehl sur l'embryologie *in* [Taton, R., 1964, 1995], p. 634.
[3] [Taton, R., 1964, 1995], p. 634.
[4] C'est là qu'un principe de type Hofmeister est implémenté.
[5] C'est bien là, on le voit aussi, que la notion de gradient aurait été trop rigide.

du champ. Un test est effectué à chaque point de croissance par le tirage d'un nombre au hasard, selon la méthode de Monte-Carlo, afin de déterminer si l'ordinateur doit ajouter une branche ou non en cette direction. Enfin, et c'est là que Cohen peut introduire son idée d'une épigenèse programmée mais toutefois sensible à la contingence de l'environnement, il reprend à Eden l'idée d'une probabilité de branchaison variable en fonction des directions du plan : cela permet de simuler des champs de densité *hétérogènes* dus cette fois-ci, non seulement aux parties déjà présentes de l'organisme, mais aussi à l'éventuelle préexistence d'un obstacle matériel étranger à l'organisme et empêchant sa pousse dans telle ou telle zone du plan. Disposant de cette souplesse de programmation, il peut également simuler des zones qui, au contraire, favorisent la pousse : la forme obtenue lui rappelle explicitement les expériences de croissance de moisissures sur un substrat nutritif hétérogène[1]. Mais aussi, et c'est également nouveau, Cohen choisit de faire varier les probabilités de croissance et de branchaison en fonction du rang graphique, donc, selon son interprétation biologique du dessin obtenu, en fonction du rang botanique de la branche par rapport au tronc[2]. C'est bien là tester l'hypothèse de la genèse hiérarchiquement organisée. Car le rang incarne bien une différence de statut biologique au niveau de l'organisation générale de la croissance.

Comme les dessins lui semblent donner des allures d'arbres ou de nervures de feuilles, ou bien encore de moisissures, qualitativement réalistes, le résultat de cette simulation lui paraît donc très concluant. Il a suffi à relever les deux défis initiaux de sa problématique théorique de l'épigenèse : 1- prouver la crédibilité d'une croissance biologique à la fois contrainte par des règles dont les formes sont fixes mais dont les paramètres sont sensibles à l'environnement ; 2- prouver la crédibilité de la représentation théorique de ce processus de croissance comme hiérarchiquement organisé. C'est donc l'ensemble de ce travail de simulation qui est publié dans la revue *Nature* en octobre 1967.

Les rôles de la programmation modulaire, de la simulation et de la visualisation

Quand on lit Dan Cohen, on voit quels sont les rôles argumentatifs qu'il donne au calculateur numérique et à sa sortie graphique. Tout d'abord, grâce à la programmation modulaire en FORTRAN[3], la variation des paramètres biologiques des lois de probabilités de croissance lui semble directement incarnée, ou représentée dans la variabilité des paramètres des sous-routines appelées par GOSUB. La structure des lois de probabilités, elle, ne change pas : ces lois peuvent donc toujours renvoyer à la même sous-routine pour être ensuite testées par un tirage de nombre au hasard. Mais ce sont leurs paramètres qui sont en revanche variables. Ils sont fixés de l'extérieur en conformité avec la configuration contingente et évolutive de l'environnement de la pousse potentielle. Grâce aux branchements conditionnels rendus possibles par la programmation informatique, le modèle peut donc intégrer une sensibilité à l'environnement qui s'exprime comme un effet en retour de l'environnement sur les paramètres génétiques. Ces sous-routines présentent bien en elles-mêmes la propriété de rechercher l'optimum spatial par auto-adaptation des règles de pousse. Il y a là un principe proche de ceux qu'affectionne Heinz von Foerster.

Ensuite, Cohen fait remarquer que ces règles mathématiques à paramètres variables sont des plus simples. La brièveté de son programme en FORTRAN (environ 6. 10^4 bits) est là pour

[1] [Cohen, D., 1967], p. 248. Eden avait déjà signalé ce point mais sans préciser la nature du substrat biologique concerné.
[2] Une branche fixée sur le tronc est de rang 1, une branche fixée sur cette branche est de rang 2, etc.
[3] [Cohen, D., 1967], p. 247.

confirmer la faisabilité de ce genre de scénario pour la nature : la petite taille du programme accrédite l'idée, d'abord contre-intuitive, que la morphogenèse naturelle n'a peut-être besoin que d'un nombre limité d'« informations » élémentaires. Cohen va même jusqu'à évaluer le nombre de gènes qui seraient nécessaires pour l'insertion biologique de ces 6. 10^4 bits : 30 gènes[1]. Cette propriété de brièveté du message informatif est également due au caractère modulaire de la programmation qui évite la répétition, dans le programme, d'instructions informatiques de formes identiques.

Enfin, il faut noter qu'avec ce modèle, Cohen n'a pas le souci de faire que le résultat ressemble encore parfaitement à un objet biologique qui l'intéresserait particulièrement. C'est là que le caractère encore théorique de son approche se manifeste donc le mieux. Toutefois, il utilise la capacité qu'a le TX-2 de visualiser ces calculs de positions de point sur une table traçante pour évaluer la réussite de son projet : il veut montrer visuellement que l'hypothèse d'une croissance à la fois structurée et épigénétique peut valoir pour les phénomènes naturels.

Le rôle épistémique de la simulation pour la biologie du développement

À ces trois rôles que Cohen confère à l'ordinateur, s'en ajoute enfin un quatrième, plus général, et qui rassemble en fait en une seule fonction épistémique les trois rôles précédents : pour le biologiste théoricien qu'il est devenu, la simulation sur calculateur numérique a pour fonction de tester des hypothèses théoriques. On pourrait s'étonner de la présence de cette idée dans la mesure où, dans la biologie des formes des années 1960, c'est surtout l'observation ou l'expérimentation sur le terrain ou en laboratoire qui sert à tester les hypothèses théoriques. Il est intéressant de revenir sur ce que veut dire précisément Cohen à ce sujet dans la mesure où l'on a sans doute ici un des premiers travaux où un théoricien de la biologie des formes s'approprie effectivement une idée qui, jusqu'à présent et pour cet objet d'étude, n'avait été avancée que par des non-spécialistes, c'est-à-dire par des non-biologistes. L'idée que l'on peut tester des hypothèses théoriques par des simulations numériques avait été exprimée, on s'en souvient, dès les débuts des calculateurs numériques, mais d'abord dans des travaux de physique nucléaire puis de biochimie et de physiologie. Sous l'impulsion des travaux initiés par le statisticien Eden, c'est donc bien chez Cohen qu'une première appropriation de l'idée de la simulation numérique entendue comme test d'hypothèse morphogénétique semble s'imposer. C'est donc avec lui que la biologie du développement et de la forme semble pouvoir s'assimiler les usages de l'ordinateur non pas seulement comme calculateur mais comme simulateur. Voici pour quelle raison selon lui :

« *Un programme de simulation qui incorpore des hypothèses au sujet du processus de génération d'une forme naturelle fournit une méthode de rejet non ambigu d'hypothèses incorrectes au moyen de la comparaison entre la forme naturelle et sa simulation.* »[2]

Selon Cohen, il faut donc deux conditions pour considérer que l'on a affaire à une simulation permettant de rejeter une théorie.

Premièrement, il faut que le programme informatique lui-même « incorpore » les hypothèses. Or, on remarquera deux choses à ce sujet : le programme a bien d'abord pour effet

[1] [Cohen, D., 1967], p. 248.
[2] "A simulation programme which incorporates some hypotheses about the generation process of a natural pattern provides a method for an unambiguous rejection of incorrect hypotheses by comparing the natural pattern and its simulations", [Cohen, D., 1967], 248.

de matérialiser en quelque sorte ce qui n'était jusqu'à présent que formulations verbales. En ce sens, le programme gagne une proximité avec l'empirie. De surcroît, la représentation informationnelle des gènes et de la « programmation génétique », courante à l'époque, aide à cette identification. Ensuite, il faut noter le pluriel d'« hypothèses » : le programme donne de la chair à un ensemble d'hypothèses et non à une hypothèse isolée. Comme on l'a vu, c'est la diversité des règles qui remplace l'unicité d'une loi. Dans ce programme, il y a les règles de croissance et les règles de branchaison, par exemple : ces deux types de règles supposées sont testés ensemble, imbriqués l'un dans l'autre.

Deuxièmement, il faut qu'une comparaison soit possible avec les « formes naturelles ». Autrement dit, la simulation ne peut avoir la force de rejeter des hypothèses que si le calculateur va jusqu'à fournir des moyens de comparaison avec l'empirie : la simulation ne rejette pas d'elle-même un ensemble d'hypothèses ; il faut que son pouvoir de rejet lui vienne, par transitivité, de la forte ressemblance de ses résultats avec ceux que l'on trouverait dans la nature. Or, il est important de noter que c'est grâce au système technique de visualisation ajouté au calculateur TX-2 que la simulation communique à l'ordinateur son pouvoir de rejeter des théories morphogénétiques, pouvoir qui, jusqu'à présent était l'apanage de l'expérimentation réelle. Notons toutefois que cette comparaison (donc cette relation de transitivité) ne se fait ici que de manière qualitative, à l'« œil », pourrait-on dire. C'est sans doute pour cela qu'à la différence d'Eden et Ulam, Cohen, sachant de quoi il parle en matière de substrat biologique, est le premier à utiliser le terme « simulation » pour désigner ce type de modélisation et de visualisation des formes vivantes sur calculateur[1]. Mais selon Cohen, ce caractère ponctuellement qualitatif n'enlève rien à la non-ambiguïté du procédé global de test d'hypothèses. Car il n'évoque ici que des phénomènes de forme déjà répertoriés comme typiques, génériques, et aisément reconnaissables globalement et à l'œil nu. Selon lui, dans le cas d'une approche théorique de la biologie des formes, les dessins de la table traçante suffisent, pour le spécialiste, à évoquer des formes d'organismes réels et réellement observés. C'est cette seule évocation elle-même qui suffit. Ainsi, les dessins ne prouvent pas les hypothèses, mais ils ne les rejettent pas et ils les conservent comme plausibles. Mais en quoi cette preuve de plausibilité ou de faisabilité importe-t-elle tant pour la biologie théorique, selon Cohen ?

Pour tenter d'éclairer les motivations épistémologiques de Cohen, nous irons jusqu'à proposer, pour notre part, une analyse complémentaire de ses résultats comme de sa proposition méthodologique à propos des usages de l'ordinateur en terme de « contenu informatif » des hypothèses. Ce type d'interprétation s'appuie sur le raisonnement que tient Popper à propos de l'apport informatif important que peut constituer la simple corroboration d'une théorie audacieuse[2]. Ce pourrait être en effet une piètre avancée pour une théorie biologique de montrer qu'elle est tout au plus plausible. Mais en fait, ce qui nous apparaît à la lecture de l'article de 1967, c'est que, aux yeux de Cohen, la démonstration de sa plausibilité apporte beaucoup à la biologie théorique dans

[1] Le titre de son article ce 1967 est bien "Computer Simulation of Biological Pattern Generation Processes". Il doit probablement l'application de ce terme dans ce contexte aux travaux de von Neumann mais aussi à sa fréquentation de von Foerster.

[2] Voir [Popper, K .R., 1963, 1985], p. 322 : « La théorie qu'il faut préférer, selon un tel critère, est celle qui en dit le plus, c'est-à-dire qui contient la plus grande masse d'informations empiriques ou dont le contenu est le plus important, celle qui est la plus forte logiquement, qui a le plus grand pouvoir d'explication et de prédiction et peut, en conséquence, être *le plus sévèrement testée* en comparant phénomènes prédits et observations. En un mot, notre préférence va aux théories intéressantes, audacieuses, et dont le degré d'information est élevé plutôt qu'à des théories triviales. » C'est l'auteur qui souligne. Cette préférabilité n'est pas fondée sur une improbabilité évaluée objectivement car elle n'est pas entendue pour le futur mais elle est dépendante de l'époque comme Popper l'a, en partie, concédé. Voir [Popper, K. R., 1972, 1991, 1998], p. 62, mais aussi la critique du philosophe des sciences Alan F. Chalmers *in* [Chalmers, A. F., 1976, 1987, 1990], pp. 100-102. C'est en ce sens faible et historiquement situé que nous recourons ici à ce raisonnement.

la mesure où il était *a priori* plus vraisemblable (au sens de plus intuitif) pour ses détracteurs que de telles règles simples et en nombre limité n'existent pas. Donc la simulation enseigne vraiment quelque chose de nouveau au biologiste à partir du moment où elle lui montre la possibilité, pour un phénomène précis, que la nature procède d'une façon contre-intuitive au regard des critères habituels de l'époque, c'est-à-dire ici qu'elle procède par des moyens simples pour obtenir des effets compliqués. Dans ces conditions, on conçoit mieux que la simulation numérique prolongée par une visualisation des formes peut gagner un statut argumentatif en biologie théorique. Cette suggestion d'interprétation complémentaire se confirme par ailleurs si l'on remarque que Cohen insiste sur le fait que ce qui importe, c'est bien la démonstration qu'une petite quantité d'information peut commander une morphogenèse au résultat compliqué[1]. Même s'il est biologiste, cet argument est repris directement des réflexions d'Eden[2] mais aussi des propos couramment tenus par les promoteurs de la cybernétique.

Il est d'ailleurs significatif que Cohen ne continue pas ensuite à simuler par ordinateur les processus de croissance de formes biologiques mais se concentre sur des problèmes de la biologie évolutionnaire. Mis à part un article de 1970, dans lequel il a encore recours à l'ordinateur pour simuler la genèse de formes par des interactions locales[3], il travaille de plus en plus avec les concepts du contrôle optimal qu'il adapte alors à la biologie des « histoires de vie »[4]. De son point de vue, le biologiste qu'il est a en effet atteint son but théorique initial avec cette simulation de 1967 : montrer une faisabilité, montrer notamment la validité du concept théorique d'« utilisation optimale de l'information »[5] pour le développement, mais non point utiliser la simulation au maximum de ses capacités pour prédire exactement une croissance dans le but pragmatique d'agir sur les productions naturelles soit pour les exploiter, soit pour les modifier. La perspective de Cohen restant théorique, la simulation reste pour lui un outil d'argumentation conceptuel, même si, dans cette première incursion dans la biologie du développement, une attention essentielle est donnée au résultat figuratif.

Importance du couplage du calculateur avec un dispositif de visualisation

À titre de bilan rétrospectif et provisoire, et d'après les travaux pionniers du biologiste Dan Cohen, il nous est en effet possible de mieux comprendre l'importance de la mise à disposition de périphériques de visualisation des résultats, à côté de la plus grande accessibilité des calculateurs, pour le transfert des techniques de simulation numérique dans la biologie de la forme et du développement. Comme nous l'avons vu, il n'a pas suffi que les formalismes se spatialisent au moyen de processus aléatoires simulés. Cohen a également utilisé la faculté d'inscrire des traits quasiment en continu sur une surface dotée d'une grand nombre de points. Et c'est cela qui nécessitait un appareil de visualisation connecté au calculateur. Toutefois le nombre total de points calculés (quelques dizaines) et figurant sur le plan géométrique n'empêchait pas en principe que Cohen dessine lui-même les figures résultantes sur du papier quadrillé à partir des nombres donnés en sortie par le calculateur. Mais il ne faut pas oublier que c'est également la rapidité et la souplesse de l'ensemble (calculateur plus table traçante) qui autorisait Cohen à faire de très nombreux essais de paramétrage pour obtenir, un peu à tâtons donc, des dessins évoquant des

[1] [Cohen,, D., 1967], p. 248.
[2] C'était aussi, on s'en souvient, un des arguments d'Ulam pour attirer l'attention des biologistes sur son modèle de croissance de formes. Voir [Ulam, S., 1962], p. 215.
[3] Voir [Cohen, D., 2000], p. 4.
[4] Voir [Cohen, D., 2000], p. 3.
[5] Voir [Cohen, D., 2000], p. 2.

formes biologiques réelles. Comme les sous-routines n'étaient calibrées sur aucune mesure de terrain, il fallait disposer d'un dispositif permettant ce genre de tâtonnement. De surcroît, avec une finesse de résolution certaine, cet appareil devait également permettre à Cohen de regéométriser la grille cellulaire et rectangulaire d'Eden en affinant considérablement la résolution initiale du modèle probabiliste. Il s'agissait en effet pour lui de pouvoir exprimer et mesurer bien plus que des simples voisinages, à savoir des angles et des longueurs, afin de rendre ainsi plus réalistes d'un point de vue biologique les dessins obtenus, donc plus susceptibles de servir au test des hypothèses biologiques.

C'est pourquoi l'on peut dire que la biologie du développement et de la forme s'empare de la simulation, notamment avec Cohen, à partir du moment où les calculateurs numériques s'adjoignent des tables traçantes ou des écrans performants. Mais comme nous l'avons vu, ce sont d'abord des hypothèses théoriques qui sont évaluées. Cependant elles sont évaluées indirectement sur des conséquences assez lointaines, entremêlées et même quasi-qualitatives, puisqu'il n'y a pas de discrimination quantitative pour estimer la recevabilité du modèle mathématique : les dessins ne sont pas évalués en tant que relevés des formes exactes ni codifiés mathématiquement ou formellement. Le calculateur et sa table traçante autorisent que la formalisation de la biologie des formes porte en fait d'abord sur ce qui est caché ou plutôt sur ce qui n'est pas la forme mais qui est à son origine.

Comme la biologie des formes n'a pu d'abord inscrire directement en un langage formel la forme des vivants elle-même (de par l'insuffisance des langages mathématiques classiques), pour tâcher d'en restituer ensuite la genèse par un modèle abstrait selon une méthode inductive, elle a alors conçu, à l'inverse, des hypothèses, quant à elles formalisables informatiquement, au sujet de ce qui engendre ces formes pour leur faire engendrer ce qu'elle voyait qualitativement : la forme globale. Ce sont ces hypothèses atomiques, car portant sur des éléments en interaction, qui bénéficient d'un traitement sur ordinateur. Le mouvement de rapprochement entre expérience et théorie n'est donc pas ici d'abstraction mais de concrétion, ou de concrétisation, si l'on préfère. Au lieu de tirer l'expérience vers le théorique en abstrayant, on fait le mouvement inverse (mais duquel résulte un égal rapprochement) de tirer le théorique vers l'expérience par une concrétisation du théorique qui se traduit, en biologie des formes, par une re-qualification du quantitatif : un dessin globalement perceptible et qualifiable à l'œil nu.

Finalement donc, même si Cohen reprend à Eden son approche cellulaire, il en reste à une prise en compte très imprécise de la morphogenèse. Même s'il regéométrise et s'il peut pour cela faire converger la simulation vers une réalité globalement reconnaissable, il ne prend en compte que des morceaux d'organes qu'il coupe les uns des autres en fonction de ce que le formalisme commande et sans souci préalable de leur signification biologique ni de leur individuation histologique ou physiologique. C'est cela qui fait le caractère encore fortement spéculatif de ses simulations stochastiques, géométriques et graphiques. Or, il n'en va pas de même pour une série de travaux qui ont leur source dans la prise en compte d'un niveau biologique à l'époque clairement discrétisé : la biologie cellulaire et la biologie moléculaire. Là se développera un terrain favorable à une approche davantage susceptible d'offrir une jonction effective avec l'empirie. La difficulté de la gestion de l'hétérogénéité de parties qui soient en même temps discrètes y est moindre, en effet. Et la modélisation algorithmique de la morphogenèse en tirera par la suite des leçons.

CHAPITRE 17 - La simulation d'automates biologiques moléculaires sur ordinateur : Walter R. Stahl (1961-1967)

Jusqu'à présent, avec les travaux de l'élève de Rashevsky, Robert Rosen, nous avions vu comment la biologie théorique d'origine biophysique, en devenant progressivement sensible aux formalismes mathématiques qualitatifs puis informationnels y résiste toutefois et décide de recourir dans ses théories à des « automates logiques » conçus sur le modèle de la machine séquentielle de Turing. Or, dans ce contexte théorique, l'ordinateur accède essentiellement au statut d'un opérateur de formalisation, aux côtés des formalismes topologiques, par exemple. Mais, avec les travaux de W. R. Stahl, la biologie théorique va se décider à donner également un autre rôle à l'ordinateur : celui de simulateur, en l'espèce, celui de simulateur algorithmique. Comme nous l'avons vu, auparavant, dès 1960, en particulier dans les travaux d'Ulam, certains non-biologistes n'avaient pas pour leur part senti de difficultés dans le fait d'admettre que l'on pouvait simuler le vivant et, spécifiquement, la mise en place des formes du vivant au moyen de l'ordinateur. Mais ces simulations n'avaient pas place dans le cadre d'une enquête biologique proprement dite et elles ne revendiquaient d'ailleurs pas cette position. Aucun calibrage sur des données biologiques de terrain n'avait été mené. D'un autre côté, à la même époque, il est par exemple significatif que Rosen, alors même qu'il a une parfaite compréhension des principes du calculateur numérique, ne voit pas l'intérêt qu'il y aurait à disposer d'un ordinateur dans son laboratoire de biologie théorique. On voit ainsi que, pour lui, l'obstacle ne provient pas d'une ignorance conceptuelle, puisqu'il intègre avec une grande maîtrise les concepts de la théorie des automates dans ses propres formalismes, mais qu'il s'enracine plutôt dans des choix théoriques et épistémologiques qui remontent eux-mêmes aux choix antérieurs du *Committee on Mathematical Biology* et de Rashevsky, son fondateur historique.

Mais à partir du moment où une biologie théorique d'origine biophysique et rashevskyenne, suivant en cela le mouvement contemporain de molécularisation de la biologie, tente, à l'échelle moléculaire cette fois-ci et non plus seulement cellulaire, de représenter formellement et par des automates les processus enzymatiques en cause dans une cellule (comme le copiage de l'ARN, etc.), les opérateurs formels que sont les « automates moléculaires » peuvent avantageusement être eux-mêmes représentés directement *dans* un automate universel (comme un ordinateur programmable en FORTRAN) et mener ainsi à une *simulation algorithmique* des interactions entre ces objets automatiques qui sont à la fois formels et représentables physiquement par des molécules. En se molécularisant, et cela notamment sous l'effet du développement de la biologie moléculaire, la biologie relationnelle s'ouvre à la simulation sur calculateur numérique. Mais, comme on le verra, ce n'est déjà plus une biologie relationnelle au sens initial que lui donnèrent Rashevsky et Rosen.

C'est le biologiste théoricien Walter R. Stahl qui, dès 1963, se propose de simuler sur ordinateur ces formalisations de molécules agissantes (les enzymes) par automates logiques dans leurs interactions au sein de la cellule vivante. Stahl ajoute ainsi à l'approche de Rosen l'idée de recourir à l'ordinateur comme objet technique, comme instrument opérationnel, pour faire réellement fonctionner les représentations de ces formalismes automatiques au niveau moléculaire. Mais comment Stahl en vient-il à s'autoriser ce que Rosen s'était interdit ? En quoi

l'échelle des phénomènes biologiques qui l'intéressent a-t-elle pu l'inciter, plus qu'une autre, à recourir à l'ordinateur pour simuler le fonctionnement du vivant ?

De l'« analyse dimensionnelle » à l'« automate moléculaire »

Afin de répondre à ces questions, il faut revenir un peu en arrière, sur la lancée intellectuelle des premiers travaux de Stahl : on y repère d'abord un déplacement sensible, et à première vue surprenant, d'un intérêt pour l'analyse dimensionnelle en physiologie et en anatomie vers la pratique de la modélisation mathématique des molécules interagissant dans la cellule. Il nous faut donc d'abord tâcher de comprendre le sens que Stahl confère à ce déplacement d'une problématique des formes (inspirée des lois d'allométrie) vers une problématique de biologie moléculaire.

En 1961, c'est bien d'abord dans l'esprit de la biophysique rashevskyenne que le jeune W. R. Stahl termine sa thèse en biologie mathématique et théorique. Dans ses premiers travaux, et à la suite de la mise en évidence par d'Arcy Thompson, Huxley, Teissier puis Rashevsky de ce que ce dernier lui-même avait appelé le principe de « proportionnalité dimensionnelle » entre différents organismes vivants[1], Stahl propose l'idée d'appliquer systématiquement aux dimensions physiologiques (masses, tailles, flux, …) des mammifères les idées de l'analyse dimensionnelle jusque là essentiellement développées dans la conception des artefacts technologiques et donc dans le domaine de l'ingénierie mécanique, chimique, rhéologique, météorologique ou thermodynamique. Selon lui, s'il est vrai qu'un cœur de souris qui pèse 0,1g et un cœur de baleine qui pèse 150kg[2] peuvent exercer l'un et l'autre la même fonction pour un corps à chaque fois proportionné selon des critères dimensionnels précis, il doit être possible d'établir un parallélisme entre la construction de modèles en technologie et ces rapports d'identification non-dimensionnels qui peuvent exister de façon si remarquable entre les espèces de mammifères. Autrement dit, Stahl prolonge les travaux antérieurs sur l'allométrie de Huxley et Teissier mais également ceux de Cohn et de Rashevsky car il procède lui aussi à une modélisation mathématique fondée sur un point de vue fonctionnel et sur une épistémologie influencée par les méthodes de « conception » (« *design* ») de l'ingénierie. Mais il insiste davantage sur l'intérêt jusque là inaperçu qu'il pourrait y avoir pour le biologiste modélisateur à *ne manipuler que des nombres sans dimensions*. Son but affiché est de proposer une nouvelle forme de modélisation mathématique en biologie physiologique qui s'appuie explicitement sur l'existence d'une espèce de modélisation naturelle, pourrait-on dire[3]. En effet, ces nombres, déduits des équations fonctionnelles déjà connues ou à découvrir, seraient appelés à remplacer les équations puisque, du point de vue de l'interprétation de l'appartenance biologique de tels systèmes, ils en représenteraient comme une caractérisation essentielle dès lors qu'ils permettraient de dépasser tel ou tel cas d'espèce animale en son individualité. De plus, selon Stahl, il ne s'agit pas là d'une modélisation purement démonstrative qui ne ferait qu'illustrer une caractéristique spécifique d'un organisme mais d'une modélisation *vraie* [« *a true model* »[4]] en ce qu'on y a affaire aux bons dimensionnements permettant de faire jusqu'à des *mesures* sur le modèle qui vaudront ensuite pour le prototype[5]. Modéliser par des

[1] [Stahl, W. R., 1962], p. 206.
[2] [Stahl, W. R., 1962], p. 211.
[3] La notion d'organisme modèle serait ainsi intégrée dans cette perspective générale sur les modèles formels.
[4] [Stahl, W. R., 1962], p. 212.
[5] [Stahl, W. R., 1962], p. 212.

nombres sans dimension aurait ainsi le paradoxal mais compréhensible avantage de faciliter le dialogue entre les mesures sur le terrain et les modèles mathématiques.

Sans se livrer d'abord à des expérimentations nouvelles mais en s'appuyant sur des travaux de physiologie pour l'essentiel déjà forts anciens, Stahl donne alors une liste assez longue de tels nombres sans dimensions[1]. Il généralise en cela ce contournement du problème de la mathématisation de la forme du vivant par le passage à la croissance relative (rapports intrinsèques) tel que nous l'avions vu à l'œuvre et analysé chez Teissier. Ces nombres sans dimension sont ainsi tous calculés à partir de valeurs physiques ayant un sens physiologique ou anatomique. Une des particularités de son travail est qu'il insiste à maintes reprises sur la parenté entre cette similitude biologique et la modélisation technologique telle qu'elle intervient en hydrodynamique, par exemple ; il assimile ainsi pleinement la nature de ces nombres physiologiques sans dimension à celle du nombre de Reynolds, par exemple, qui caractérise le rapport des forces inertielles aux forces visqueuses s'exerçant dans un fluide, mis à part le fait que dans le cas biologique, la généralité de ces nombres sans dimension lui paraît tout de même moindre[2]. Mais, selon lui, cela permet néanmoins de définir des « classes » de systèmes physiologiques. C'est là pour lui, en quelque sorte, reprendre la notion de similarité qualitative que Rashevsky avait mise en évidence avec son « principe d'épimorphisme » réputé valoir entre *fonctions* organiques et entre *organismes* entiers. Mais, à la différence de Rashevsky, Stahl précise sa propre notion de similarité en la faisant d'abord s'appuyer sur des éléments organiques précisément mesurables, c'est-à-dire sur des *structures* quantifiables (avec leurs dimensions physiques) et non sur des *fonctions*[3], et ensuite en la « déquantifiant », si l'on peut dire, par passage de ces quantités structurelles à leurs rapports constants et, pour finir, aux nombres sans dimensions nés de la constance de ces rapports métriques.

Un des arguments majeurs que Stahl avance en faveur de l'intérêt du passage, en physiologie, d'une approche métrique à une approche sans dimension[4] s'appuie sur une réflexion ayant sa source en génétique : il est probable, selon Stahl, que les gènes soient à concevoir comme porteurs d'éléments d'information non dimensionnelle[5]. Dès lors, le travail du

---

[1] Voici trois exemples de nombres physiologiques sans dimension et empiriquement assez stables (donc supposés caractéristiques) chez les mammifères parmi les 25 que donne Stahl : la masse du rein sur la masse du poumon = 19 ; le temps de respiration sur le temps de pulsation cardiaque = 3, 9 ; la durée de vie sur la durée d'une respiration = 2. 10^8, [Stahl, W. R., 1962], p. 207.

[2] "However, in Biology the dimensional constants are very much more limited in scope and serve to characterize systems of limited range", [Stahl, W. R., 1962], p. 206. Malheureusement, Stahl ne précise pas davantage cette différence entre nombres non-dimensionnels physiques et nombres non-dimensionnels biologiques : elle semble n'être que de degré dans la généralité… Le fait qu'il ne le précise pas est toutefois cohérent avec son projet de ne pas faire de « métaphysique » : il ne veut à aucun prix tomber dans un commentaire sur la nature supposée primordiale des dimensions de base (comme la masse M, la longueur L, le temps T…). Car il affirme qu'il n'y a là aucun mystère, « rien de sacro-saint » (« *nothing sacrosanct* », *ibid*., p. 205). Il s'agit simplement de dimensions élémentaires « indépendantes les unes des autres » *(« independent of each other »*, *ibid*., p. 205), sans plus de valeur ontologique qu'une base vectorielle particulière dans un espace vectoriel, pourrions-nous ajouter. Dans un article de 1961, Stahl avait d'ailleurs démontré que la structure à laquelle les symboles de dimensions appartiennent est identifiable à un groupe abélien (*ibid*., p. 205).

[3] Comme on l'a vu, depuis son tournant topologique c'est le type même de théorisation de la biologie que Rashevsky récuse, notamment chez Rosen. Mais Stahl peut ne pas se sentir menacé par ces arguments d'un biophysicien réfugié sur le tard dans une biologie mathématique fonctionnelle (au sens de la fonction biologique) et qualitative en précisant, comme il le fait, qu'il ne propose ici qu'un type nouveau de modélisation et non de théorisation.

[4] Même s'il admet que son approche ne devra pas remplacer l'« analyse par équations différentielles » : "Derivation of dimensionless numbers and similarity criteria is not a substitute for analysis by differential equations, but it often helps to show what properties are most important and invariant in related structures", [Stahl, W. R., 1962], p. 210.

[5] On reconnaît là un argument que, dans un contexte de physiologie théorique des plantes, Dan Cohen emploiera cinq ans plus tard afin de légitimer sa première simulation sur ordinateur de la croissance d'arborescences. Cohen la concevra ainsi non comme une représentation réaliste mais comme un simple test pour l'hypothèse théorique selon laquelle il n'est en fait pas besoin de beaucoup de gènes (c'est-à-dire d'informations génétiques) pour déterminer la mise

développement de l'organisme et de ses organes (embryogenèse, organogenèse) serait assimilable à la transcription d'une série d'informations (représentables par des nombres sans dimensions) en équations dotées de variables dimensionnées[1]. Autrement dit, aux yeux de Stahl, en usant de cette représentation non-dimensionnelle des structures anatomiques ou des processus physiologiques, on s'approche d'une représentation de ce qui semble plus directement déterminé par les gènes. Donc, tout en étant attentif aux invariants de structure, on se rapproche de ce que font les gènes, de leur fonction. D'où son grand intérêt *a priori*.

Une influence de la biologie moléculaire sur la modélisation mathématique du vivant

En 1962, dans la suite de ses recherches, notamment après son travail de post-doctorat au service des *National Institute of Health* et une fois qu'il a été intégré aux départements de médecine et de mathématique de l'Université d'Etat ainsi qu'au Département de Biométrie du Centre de Recherche sur les Primates de l'Oregon, Stahl abandonne quelque temps l'application de l'analyse dimensionnelle à la biologie pour se consacrer précisément à la modélisation de l'activité enzymatique dans la cellule en gardant à l'esprit l'idée que c'est précisément cette activité qui est déterminée par les gènes. Il passe donc d'un projet de modélisation mathématique de l'anatomie et de la physiologie à la modélisation des objets particuliers de la toute jeune biologie moléculaire : les molécules, les gènes et les enzymes. Selon nous, il faut voir dans cette évolution *a priori* assez étonnante, même si l'époque s'y prête, deux raisons possibles et non exclusives. D'une part, dès son arrivée dans l'Oregon, Stahl fréquente régulièrement ses collègues du Département de Traitement Automatique des Données dans la mesure où le Département de Mathématiques auquel il est rattaché abrite déjà un groupe de traitement de données dédié aux « biomathématiques »[2] : il sympathise notamment avec un automaticien du nom de Harry E. Goheen avec lequel il publie un article important dès 1963 : "Molecular Algorithms". Ce dernier l'initie au formalisme des machines séquentielles au sens de Turing. Or, la rencontre avec les idées de Turing constitue pour lui une véritable révélation. En 1967, Stahl avouera même que c'est plutôt sous l'influence particulière de l'article tardif "Computing Machinery and Intelligence (Can Machines Think ?)" de Turing (1950)[3] qu'il propose en 1963 la notion de « modélisation algorithmique »[4]. En effet, il aperçoit là une possibilité de généraliser sa vision de la modélisation (qu'il percevait d'abord sous le seul angle de l'analyse dimensionnelle et de l'invariance numérique) en employant ce qu'il appelle des « critères de similarité » : la modélisation de la pensée humaine telle que la propose et l'anticipe Turing, dans son fameux test de 1950, n'est, pour Stahl, rien d'autre qu'une forme de modélisation où réside là aussi une invariance minimale mais qui n'est plus de nature dimensionnelle, métrique ou numérique, mais seulement *algorithmique*. L'expression « critères de similarité » se veut donc plus englobante encore puisqu'elle intègre aussi bien les invariants numériques entre un modèle et son prototype que les invariants algorithmiques : en ce sens une machine pourrait penser de façon similaire à un homme. Elle pourrait procéder selon les mêmes étapes élémentaires d'induction, de déduction ou de calcul, par exemple. Il y aurait ainsi une invariance algorithmique de l'homme à la machine.

---

en place d'une morphologie complexe. Voir *supra*. En 1962, parce qu'il reste dans la généralité des problèmes de dimensionnement, Stahl est pour sa part loin de disposer d'un tel argument dans sa précision. Tout au plus, le fait avéré des nombres sans dimensions peut à lui seul valoir comme un ébauche d'argument.

[1] [Stahl, W. R., 1962], p. 211.

[2] [Stahl, W. R. et Goheen, H. E., 1963], p. 285.

[3] Paru dans *Mind*, 1950, vol. LIX, no. 236, pp. 433-460.

[4] [Stahl, W. R., 1967c], p. 202.

D'autre part, au vu des avancées récentes de la génétique biochimique et en continuité avec les derniers propos que nous avons rapportés de son article de 1962, Stahl croit pouvoir d'ores et déjà tirer une conséquence radicale pour la conception que l'on doit se faire de la cellule :

« *Durant la dernière décennie, un progrès spectaculaire dans l'analyse de la génétique biochimique et de la biologie moléculaire a conduit à la conviction croissante que tous les processus cellulaires sont logiquement contrôlés et complètement déterminés par le code génétique. Du point de vue des mathématiques modernes, la cellule peut être regardée comme un grand système de computation ; et ses mécanismes de contrôle général peuvent être examinés à la lumière de la théorie de la computation.* »[1]

Stahl a donc le projet de construire une représentation algorithmique des processus enzymatiques et cellulaires parce que, selon lui, on dispose désormais de connaissances biologiques nouvelles qui, sur le fond de ce qu'elles révèlent du fonctionnement enzymatique, légitiment pleinement le recours à des mathématiques qui se trouvent être elles aussi nouvelles. Il lui semble qu'à l'échelle moléculaire, on peut d'ores et déjà faire l'économie du passage par l'analyse dimensionnelle, par cette technique de modélisation qui devait servir à terme à extraire du vivant des rapports à la fois constants et interspécifiques. En effet, de par son origine biophysicienne, Stahl connaissait les derniers travaux « biotopologiques » de Rashevsky et Rosen. À leur contact, il avait perçu l'importance qu'il y avait de trouver d'autres mathématiques que la géométrie ou que l'analyse : son engouement antérieur pour l'analyse dimensionnelle peut aussi rétrospectivement s'expliquer par le fait qu'il cherchait déjà à l'époque à s'émanciper des métriques pour atteindre à un niveau plus formel. Et lorsqu'il prend connaissance de la théorie des automates logiques, Stahl envisage de recourir à l'ordinateur car il a la forte impression de se trouver à la croisée féconde d'une connaissance nouvelle et d'un formalisme tout trouvé. De plus, et à la différence de Rosen, cette application des automates, à la condition qu'on la conçoive au niveau moléculaire, lui semble pouvoir être comprise plus largement et à deux niveaux : au niveau du formalisme comme au niveau de la manipulation du formalisme, à savoir au niveau d'une simulation sur ordinateur du formalisme des automates. Qu'on observe ici que c'est bien toujours pour Stahl se placer dans la continuité d'une attention préférentielle aux structures concrètes des organismes, en forte rupture avec le premier tournant topologique et abstractif de la biologie relationnelle : car c'est bien le changement d'échelle structurelle, le passage au niveau moléculaire qui, selon lui, autorise que la *structure spatiale* soit simulée en *fonctionnement*, c'est-à-dire que la *structure* soit représentée en même temps comme une *fonction*, que la structure soit fonctionnante du fait même de sa structuration. Ainsi, la structure moléculaire (la chaîne d'ADN par exemple) semble fonctionner tout en structurant et en se structurant, au même titre que la bande de données d'une machine de Turing.

C'est cette possibilité, accessible semble-t-il précisément et d'abord uniquement au niveau moléculaire, de marier la représentation mathématique structurelle d'une *structure* biologique et la représentation mathématique fonctionnelle d'une *fonction* biologique qui incite Stahl à passer à la simulation des automates logiques, c'est-à-dire à leur représentation sur ordinateur. Il passe ainsi à une représentation automatique des automates. Ce faisant, il passe également ce cap que

[1] "During the last decade spectacular progress in analysis of biochemical genetics and molecular biology has led to an increasing conviction that all cellular processes are logically controlled and completely determined by the genetic code. From the viewpoint of modern mathematics the cell may be regarded as a large computation system and its overall control mechanisms examined in the light of computation theory", [Stahl, W. R. et Goheen, H. E., 1963], p. 267.

Rosen n'avait voulu franchir : le cap de la simulation, c'est-à-dire de la représentation effective de structures organiques sur ordinateur. C'est qu'avec son objet biologique (l'enzyme…), notamment depuis les travaux de 1961 dus à François Jacob et à Jacques Monod[1], il n'a pas à choisir entre une biologie qualitative, topologique ou informationnelle et une biophysique métrique et mécaniste. Les deux semblent pouvoir se conjoindre à cette échelle : il ne rencontre donc pas la même répugnance que Rosen à utiliser l'ordinateur comme simulateur. Or, pour cela, Stahl trouve nécessaire, avec l'aide de ses collègues automaticiens (dont Howard E. Goheen, mais aussi Lee B. Lusted, le directeur du Département de Traitement Automatique des Données et de Biomathématiques) de se plonger dans la théorie des automates et de la computation en commençant par la base : les articles de Turing. C'est d'ailleurs cette base sur la machine de Turing que Goheen et lui-même se sentent dans l'obligation de rappeler assez en détail (parce qu'ils la supposent peu connue) aux lecteurs du *Journal of Theoretical Biology* au début de leur article de 1963. Ce qui indique combien les biologistes, même les biologistes théoriciens, sont encore peu au fait de ces nouveaux formalismes.

Dans ce travail, les auteurs conçoivent ce qu'ils appellent un « enzyme algorithmique », c'est-à-dire un automate qui a la faculté de transformer des substances biochimiques représentées structurellement par des chaînes de lettres[2]. Pour pouvoir employer commodément la notion de machine de Turing, les auteurs utilisent une présentation équivalente : les Tables de Turing, c'est-à-dire une sorte de tableaux dans lesquels paraissent les symboles des mouvements (à gauche et à droite) de la tête de lecture de l'automate, et ceux qui commandent une écriture ou un éventuel effacement de la case actuellement lue sur la chaîne. Le résultat est l'état final de la chaîne lorsque l'automate s'arrête. Ils proposent alors une série de Tables « simulant »[3] des activités enzymatiques comme le copiage d'une chaîne d'ADN représentée sous la forme d'une chaîne de lettres. Après avoir prudemment tempéré leur enthousiasme initial, notamment en évoquant le problème de la non-calculabilité qui pourrait s'avérer être la règle en biologie dès le niveau cellulaire, les auteurs montrent que l'on peut tout de même voir se manifester ce qu'ils appellent « une homéostasie logique »[4] lorsque l'on met en œuvre en même temps plusieurs dizaines d'« enzymes algorithmiques » de ce type. En fait, les auteurs se contentent de montrer que, dans ce dernier cas, le système simulant total devient équivalent à un réseau de neurones formels à seuil de type Pitts-McCulloch (1943). Les auteurs connaissent d'ailleurs personnellement Warren McCulloch et ils ont été, sur certains points, conseillés par lui[5]. Le système simulant sera, selon eux, en « homéostasie logique » lorsqu'il se maintiendra en équilibre et présentera une stabilité au regard des erreurs de codage et des perturbations environnementales.

---

[1] Stahl cite le célèbre article de François Jacob et Jacques Monod paru en 1961 dans le *Journal of Molecular Biology* "Genetic Regulatory Mechanisms in the Synthesis of Proteins" (*J. Mol Biol.*, 3, 1961, pp. 318-356) dans [Stahl, W. R. et Goheen, H. E., 1963], pp. 267 et 285, puis dans [Stahl, W. R., 1965], p. 293. Rappelons que, dans cet article, les auteurs présentent d'abord le système enzymatique d'induction et de répression de l'expression des gènes puis la notion de gène régulateur qu'il distingue de celle de gène structural. Ils montrent notamment que les gènes régulateurs sont chargés de réguler certaines inductions de l'expression de gènes structuraux par l'inhibition d'une répression. C'est ce que Michel Morange appelle « le schéma général de régulation négative de l'expression des gènes » [Morange, M., 1994], p. 202. Il faut cependant noter que Stahl et Goheen ne font aucun usage de l'approche cybernétique (c'est-à-dire par boucles de régulation) de Monod et Jacob car ce n'est pas ce formalisme qu'ils vont employer : cet article les impressionne uniquement parce qu'« il analyse des processus cellulaires du point de vue du contrôle moléculaire » ("…*and others which analyzes cellular processes from the viewpoint of the molecular control*", [Stahl, W. R. et Goheen, H. E., 1963], p. 267. Ce n'est donc pas par ce biais cybernétique (même si leur approche implémente également un contrôle logique) qu'ils ont l'idée de recourir à l'ordinateur conçu à la fois comme modèle de formalisme et comme simulateur.

[2] [Stahl, W. R. et Goheen, H. E., 1963], p. 266.

[3] C'est bien le terme « *simulating* » qui est employé : voir [Stahl, W. R. et Goheen, H. E., 1963], p. 273.

[4] "logical homeostasis", [Stahl, W. R. et Goheen, H. E., 1963], p. 273.

[5] [Stahl, W. R. et Goheen, H. E., 1963], p. 285.

Par la suite, en 1967, Stahl publie une série d'articles qui proposent notamment un modèle d'auto-reproduction cellulaire sur ce même principe du traitement par automates de chaînes de caractères et dans lequel l'auteur fait représenter par le programme d'ordinateur 36 puis 46 gènes qui, sous la forme d'automates formels, codent pour des enzymes différentes. Il obtient alors ce qu'il appelle un « modèle de cellule algorithmique »[1] où une cellule entière tend à être représentée au moyen d'un grand nombre de réactions enzymatiques. Stahl reconnaît qu'il s'agit là d'un modèle « hautement idéalisé »[2] dans la mesure où seule une infime proportion des réactions enzymatiques supposées intervenir dans la cellule réelle est prise en compte. Cependant, ce travail peut, selon lui, être « chargé de sens » pour les biologistes moléculaires dans la mesure où il peut suggérer des voies d'accès aux phénomènes réels en leur en fournissant une meilleure intuition (rôle heuristique).

Faisant allusion à la technique d'évaluation quantitative de l'organisation d'une cellule-modèle au moyen de la théorie de la communication de Shannon (technique de l'entropie informationnelle relativement élémentaire qu'il ajoute dans le premier article de 1967), Stahl affirme également qu'une telle simulation peut même fournir selon lui une « aide conceptuelle pour la compréhension des cellules réelles »[3]. En même temps, Stahl indique l'existence d'une autre valeur épistémologique pour ces simulations (qu'il effectue en FORTRAN sur un ordinateur SDS-920) en précisant qu'elles donnent lieu à ce qu'il appelle des « expériences sur ordinateur »[4]. Ces « expériences » servent, selon lui, à tester la stabilité et l'homéostasie logique du modèle de cellule tout entier. Ainsi, alors qu'à la même époque, au RLE du MIT, Cohen[5] teste par simulation une hypothèse théorique sur le contrôle génétique de la morphogenèse, Stahl, en se plaçant pour sa part au niveau moléculaire, utilise une simulation du fonctionnement de la cellule par processus de traitements de chaînes automatisés pour tester la crédibilité *a priori* de l'hypothèse de l'existence d'une stabilité procédant par pure régulation logique et résultant globalement des interactions des enzymes au niveau local. En outre, il faut noter que, si son programme ne prévoit pas une représentation effectivement spatialisée du modèle de cellule résultant (puisque les automates ne sont pas sensibles à la répartition des substances), Stahl en fournit tout de même une, dessinée à la main, dans ses deux premiers articles de 1967 : on y voit un contour circulaire (la cellule) formé par des lettres (codant la membrane) et renfermant des enzymes et un noyau avec sa propre membrane ainsi que son ADN, tous représentés là encore sous forme de chaînes de caractères géométriquement disposées de sorte à donner au modèle une allure rappelant la forme concrète d'une cellule réelle.

Stahl a ainsi conscience qu'il propose bien une simulation ou un modèle *sur ordinateur* (« *computer model* ») de la cellule et de son auto-reproduction et non un modèle *mathématique* : cela tient au fait que, selon lui, il propose une « représentation directe et littérale » des substances biochimiques. Ainsi, il rattache sa perspective à celles qui ont déjà vu le jour dans ce qu'il appelle « les mathématiques modernes » et qui ont consisté à contourner les difficiles résolutions de certaines équations différentielles par le moyen de la simulation[6]. Cependant, de façon tout à fait suggestive, il tient également à distinguer son approche de celle du biophysicien et biochimiste

[1] "the algorithmic cell model", [Stahl, W. R., 1967a], p. 584.
[2] "The model is highly idealized. It bears somewhat the same relationship to real cells as computer circuits do to the brain, but shows that automata theory should be applied to molecular biology in a meaningful way", [Stahl, W. R., 1967a], p. 581.
[3] "a new conceptual aid for understanding real cells", [Stahl, W. R., 1967a], p. 604.
[4] "Computer experiments", [Stahl, W. R., 1967a], p. 581.
[5] Voir *supra*.
[6] "In modern mathematics, there has been a growing tendency to bypass solution of differential equations, as such, and rather to simulate complex kinetics interactions in a more direct and literal manner", [Stahl, W. R., 1967b], p. 202.

David Garfinkel[1] qui, pour sa part, propose ce que Stahl appelle « un modèle de calculateur numérique de la cinétique enzymatique »[2]. On se souvient en effet que Garfinkel représentait les molécules biochimiques une à une dans la mémoire de son ordinateur et qu'il demandait ensuite au programme en FORTRAN d'en organiser aléatoirement (par la méthode de Monte-Carlo) les rencontres et les réactions. À ce titre, dans les simulations numériques de Garfinkel, les interactions entre les éléments représentés « littéralement » sont réduites au minimum alors que ce qui caractérise la simulation de Stahl consiste dans le fait qu'il a voulu implémenter jusqu'aux *fonctions logiques et de régulation* que certains de ces éléments pouvaient exercer les uns sur les autres. Ainsi, le modèle de Garfinkel ne s'occupe que de cinétique enzymatique mais pas de l'induction enzymatique ni des mécanismes que déploient les acides nucléiques[3]. C'est que Stahl, au contraire de Garfinkel, ne part pas d'équations différentielles préexistantes dont il donne ensuite une interprétation atomiste ou moléculaire pour mieux les résoudre ou les approximer lorsqu'elles sont insolubles analytiquement. Il part du gène concret dans sa complexité structurelle supposée. Il part de l'action du gène entendue comme une série d'activités logiques et automatiques donc algorithmiques : d'où une représentation à la fois littérale (c'est-à-dire structurelle sans qu'elle soit pourtant effectivement spatialisée) et fonctionnelle, bien que très idéalisée.

C'est semble-t-il la raison principale pour laquelle, par la suite, à la fin des années 1990, la plupart des bioinformaticiens et des spécialistes de la génomique verront dans cet article de Stahl et Goheen le travail séminal qui a conduit à l'émergence de leurs propres disciplines[4]. En 2001, le bioinformaticien Jake Chen reconnaîtra ainsi que ce qui fait rétrospectivement la valeur de ce travail tient au fait qu'il essaie de trouver, au moyen d'une représentation sur ordinateur, une « corrélation adéquate entre les structures et les fonctions moléculaires »[5]. Pour notre part, avec cette évocation de Walter R. Stahl, nous ne faisons qu'indiquer ici, en passant, un point de bifurcation de la simulation sur ordinateur de phénomènes biologiques structuraux, d'une part vers l'algorithmique moléculaire, qui deviendra en effet la bioinformatique aux alentours de 1990, d'autre part, vers la modélisation sur ordinateur de phénomènes biologiques plus intégrés et se manifestant à échelle macroscopique, comme les phénomènes de développement et de morphogenèse que nous continuerons ici à suivre plus particulièrement. Nous ne retracerons donc pas dans la suite l'histoire de la branche « moléculaire » de la simulation des phénomènes biologiques sur ordinateur. Nous renvoyons pour cela à l'historique de Jake Chen[6].

---

[1] Voir *supra*.
[2] "Digital computer models of enzyme kinetics", [Stahl, W. R., 1967b], p. 200.
[3] [Stahl, W. R., 1967b], p. 200.
[4] Jake Chen rappelle et adapte les définitions de ces deux termes récents et au sujet desquelles il pourrait, selon lui, y avoir une sorte de consensus. Cependant, même si nous ne pouvons nous étendre ici sur la question, nous nous devons d'ajouter cet avertissement en préambule : la désignation de bioinformatique est en fait actuellement âprement discutée et disputée par ceux qui pratiquent justement la simulation des êtres vivants sur ordinateur *à échelle non moléculaire*. Voir, sur ce point, notre entretien avec François Houllier : [Houllier, F., Varenne, F., 2000]. Selon Chen donc, « la bioinformatique est la capture, le management, l'analyse et la dissémination de l'information biologique en lien avec la découverte de médicaments émergents et avec des paradigmes de traitement de maladies. C'est une étude interdisciplinaire aussi bien qu'une pratique industrielle. Elle utilise des techniques venues primitivement de la technologie de l'information, des statistiques et de la biologie computationnelle de façon à traiter et à analyser des données générées à partir de la génomique structurale, de la génomique fonctionnelle, de la protéomique, de la chimie combinatoire et des projets de tri à sortie de haute qualité [« *high-throughput screening projects* »] », [Chen, J., 2001], p. 2. Chen définit alors la « biologie computationnelle » elle-même comme l'« étude des méthodes computationnelles en biologie », *ibid.*, p. 2. Il rappelle également que la génomique est la discipline qui cartographie, analyse et séquence le génome. Indiquons enfin pour notre part que la protéomique est « l'étude des protéines, de leur emplacement, de leur structure et de leur fonction » (définition extraite du site de Génome/Québec : http://www.genomequebec.com/asp/dirProteomiqueBref/proteomics.asp).
[5] "the proper correlation between molecular structures and functions", [Chen, J., 2001], p. 4. Chen définit alors la biologie computationnelle comme l'« étude des méthodes computationnelles en biologie », *ibid.*, p. 2.
[6] Voir [Chen, J., 2001], pp. 2-7.

Une épistémologie néo-positiviste des modèles : assumer et neutraliser la dispersion (1967)

Mais, pour revenir à Walter R. Stahl et à ses recherches, on peut constater que, parallèlement à ses propres travaux de modélisation, il continue sa réflexion méthodologique sur les modèles. En 1967, il produit ainsi un travail ambitieux qui recense déjà près de 285 modèles différents[1] et dans lequel il essaie d'unifier méthodiquement la pratique des modèles sous un ensemble de principes et de critères communs. Il déplore en effet qu'on ait à subir une inflation et une dispersion de modèles dont les critères de validité ne nous sont pas toujours fournis par les concepteurs eux-mêmes, quand bien même ces concepteurs auraient réellement pris conscience que tout modèle ne peut avoir qu'un domaine de validité limité. Ce qui n'est même pas toujours le cas, selon lui. La raison en est que les biologistes n'ont pas encore tous pris la mesure de la différence entre théorie et modèle. Il s'agit donc d'alerter la communauté des biologistes théoriciens sur le sens et la valeur de la modélisation en général, et de la modélisation mathématique en particulier, en cette deuxième moitié des années 1960.

Ainsi donc, dans cet article bilan sur l'état de la modélisation en biologie comme dans les sciences et les technologies en général, Stahl va jusqu'à proposer une classification systématique de tous les modèles existants en fonction de la nature des « critères de similarité » à chaque fois mis en œuvre entre modèle et prototype[2] : on y retrouve bien sûr ses réflexions antérieures sur les nombres sans dimensions mais on voit également que la modélisation algorithmique (modélisation *par* automate et simulable *sur* automate ou ordinateur) a définitivement pris une place *aux côtés* des modélisations organiques, physiques, analogiques ou stochastiques (c'est-à-dire notamment biométriques[3]) plus anciennes, puisque les critères de similarité, même s'ils sont beaucoup plus abstraits en étant algorithmiques et non plus seulement numériques, n'en demeurent pas moins mathématiques et/ou computationnels, selon Stahl, depuis que l'émergence de l'ordinateur nous en a persuadé. Au passage, il considère donc que même les modèles qui ne peuvent être que simulés sont encore des modèles mathématiques parce qu'ils restent computationnels au sens de la théorie mathématique de la computation[4]. En conséquence, selon Stahl, comme pour le philosophe des sciences américain Patrick Suppes qu'il cite[5], l'unification finale de tous les types de modèles utilisés dans les sciences de la nature se poursuit donc en droit jusque dans la *théorie*

[1] [Stahl, W. R., 1967c], p. 207.
[2] Voir le tableau récapitulatif de [Stahl, W. R., 1967c], pp. 172-173.
[3] Significativement, Stahl classe les modèles statistiques de la *biométrie* parmi les modèles à invariants *numériques* (aux côtés des modèles à équations différentielles) alors que sa classification pourrait autoriser qu'on les situe également dans les modèles plus abstraits, aux côté des modélisations topologiques, relationnels ou algorithmiques. Voir [Stahl, W. R., 1967c], p. 172. À regarder de près les travaux de R. A. Fisher en effet, il n'est en principe pas impossible de considérer que l'invariance principale (au sens de Stahl) se situe, dans ses modèles, au niveau de la courbe de distribution de fréquence *tout entière*, prise comme un tout, *abstraite* en ce sens, puisqu'abstraite des données numériques particulières qui, en revanche, permettent de l'inférer et d'en estimer les paramètres vraisemblables. Sans doute ce choix de classification est-il davantage dû au fait que les modèles statistiques ont initialement surtout été promus dans un contexte de biologie expérimentale et non de biologie théorique. Or, Stahl, de par son appartenance initiale à la biophysique théorique, s'attend *a priori* à ce que les modélisations les plus abstraites viennent nécessairement de la biologie théorique.
[4] Dans la modélisation qu'elle soit physique, analogique ou abstraite, il s'agit donc toujours pour lui de rapports invariants entre « propriétés mathématiques » : "A model and prototype, or two similar systems, can be transformed or mapped into each other in some sense. During this transformation process some mathematical properties shall be found to be invariant and these properties are precisely those defining the extent of modeling. The mapping may be very 'practical', as in the case of numerical scale-up, or entirely abstract, as found in relational, topological, and algorithmic representations of allegedly similar biological systems", [Stahl, W. R., 1967c], p. 208.
[5] [Stahl, W. R., 1967c], p. 175. Patrick Suppes est né en 1922.

mathématique des modèles[1] où l'attention exclusive n'est cependant portée que sur la seule notion d'isomorphisme.

En 1967, tout l'enjeu de la suggestion méthodologique et épistémologique de Stahl consiste en fait à montrer que sa propre notion de « critère de similarité », qu'il avait auparavant introduite pour généraliser ses réflexions sur l'analyse dimensionnelle et sur la modélisation, peut être assimilée à la notion mathématique, elle aussi très souple, d'isomorphisme, pourvu qu'on la prenne au niveau abstrait et théorique (au sens donc de la « théorie des modèles ») des rapports formels entre structures et non pas seulement au niveau des simples bijections entre ensembles d'éléments. On retrouve là, sous une forme encore transformée, la tendance à résister à la dispersion des modèles dans le contexte de la biophysique théorique. Mais comme c'était le cas avec la proposition d'introduire une entropie généralisée, formulée par des conceptions physicalistes réactualisées, ou avec la proposition d'employer le concept mathématique de catastrophes, née dans une perspective mathématico-physicaliste renouvelée, Stahl propose là aussi une résistance qui se veut modernisée, car fondée sur une convergence et sur une absorption mutuelle des modèles dans une « théorie des modèles », donc dans un modèle mathématiste et formaliste des modèles. Ainsi, ce point de vue nettement formaliste et spéculatif permet-il d'exorciser commodément, plus exactement de *neutraliser* la dispersion formelle, désormais avérée, tout en ne renvoyant pas à un réenracinement des modèles.

Purger les modèles de toute métaphysique

En outre, il est un argument, remarquable par son côté un peu exotique au regard du contexte, mais qui revient à plusieurs reprises sous la main de Stahl lorsqu'il s'agit pour lui de légitimer son entreprise de théorisation et de mathématisation *a posteriori* des procédés de modélisation : montrer, à la suite des épistémologues comme Patrick Suppes, que modéliser ne consiste finalement qu'à mettre au jour des isomorphismes entre le modèle et le prototype présente comme résultat collatéral majeur, outre l'unification conceptuelle et la plus grande rigueur qui devrait en découler logiquement chez les concepteurs de modèles, de vider tous les modèles des relents de métaphysique qui ont ou qui auraient pu présider à leur conception comme à leur légitimation originelle. En mathématisant sur le tard une pratique d'abord hétéroclite et à l'origine donc douteuse du point de vue positiviste, le biologiste et théoricien de la biologie qu'est Stahl, comme Woodger en son temps[2], se livre à une entreprise à ses yeux salutaire dans la mesure où il s'y présente comme un purificateur qui purge les modèles de tout ce qui pourrait leur rester de métaphysique[3]. Stahl affirme ainsi que ce qui vaut, pour Turing, sur le sujet philosophiquement sensible de la modélisation de la pensée, vaut par extension pour tout type de modélisation. Axer consciemment son épistémologie de la modélisation sur le seul côté formel du test de performance ou sur le seul côté formel des invariants fonctionnels, dimensionnels ou numériques revient dans les deux cas au même. Selon Stahl, on s'y délivre toujours d'une référence confuse à un substrat à tout le moins énigmatique, si ce n'est inaccessible voire inexistant, donc méta-physique en ce sens

[1] [Stahl, W. R., 1967c], p. 174.
[2] Que Stahl connaît, cite et auquel il rend hommage. Voir [Stahl, W. R., 1967c], p. 207.
[3] "There is no unique fundamental justification for stating that one model is a 'best model', and choice is made on utilitarian, not metaphysical, absolute ground", [Stahl, W. R., 1967c], p. 171. Voir également : "As was made clear in the pioneering work of Turing, there need be no metaphysical problem in simulating human thought or intelligence. The problem is rather one of recognizing and clearly stating what particular kinds of brain function are of interest and how similarity of the model and prototype are to be determined in an objective manner, i.e., which specific performance criteria (test algorithm) govern the related system", [Stahl, W. R., 1967c], p. 204.

strict. Stahl s'autorise donc du geste de déracinement de Turing pour donner de la modélisation une représentation elle-même formelle qui a le pouvoir d'innocenter, au moins en droit, tout type de modèle, et pas seulement les modèles algorithmiques ou abstraits, devant l'accusation de se livrer à des affirmations métaphysiques. Dans le même geste, comme Rashevsky ou Rosen auparavant, il annule l'effet corrosif de la dispersion en promouvant une convergence absorbante entre formalismes.

Mais Stahl ne dit pas précisément ce qu'il entend par « métaphysique ». À le lire cependant, on peut comprendre qu'il entend désigner par ce terme l'erreur qui consisterait à valoriser un modèle au détriment d'un autre au prétexte que ce modèle refléterait *mieux* la réalité, qu'il y serait mieux enraciné, et non parce qu'il est plus efficace et performant au seul niveau des critères algorithmiquement calculables, c'est-à-dire *objectifs* en ce sens qu'ils seraient *opérationnels* et *intersubjectifs* : accessibles et mesurables en droit par tous. Un modèle dont la similarité ne serait pas testable par de tels critères serait préféré pour des raisons purement subjectives, non objectives. C'est cela que n'admet pas Stahl. Et l'on peut comprendre que sa théorie formelle de la modélisation lui semble se présenter comme un rempart contre ce risque car, en particulier, si elle établit une classification, elle n'établit pas pour autant de hiérarchie entre les modèles : tout type de modèle part à armes égales avec ses concurrents. Tout dépend de l'usage que l'on veut en faire. Et c'est à chaque fois que l'on veut l'employer que l'on doit vérifier si sa formulation précise est conforme aux critères de similarités pertinents *pour cet emploi*, ces critères étant dans le détail à chaque fois différents en fonction de l'usage que l'on veut faire du modèle. Il n'y a donc pas de critères de similarité qui soient en eux-mêmes, et dans l'absolu ou en référence à une réalité intangible, meilleurs que d'autres. Le monde des modèles, selon Stahl, est certes ordonné mais il est éminemment démocratique, si l'on peut dire[1]. L'épistémologie de Stahl, de tonalité donc elle aussi nettement positiviste au sens du positivisme logique anglo-saxon et de sa version sémantique, lui permet d'insister sur le caractère toujours partiel du modèle[2] mais aussi sur la différence entre théorie et modèle :

« Ce ne serait probablement pas une exagération d'affirmer que la modélisation et la simulation représentent les plus importants des outils singuliers de la biologie théorique. Dans la science moderne, le simple exposé verbal d'une 'théorie' n'est plus considéré comme adéquate et l'on attend des construits mathématiques de diverses sortes. Ces derniers peuvent paraître sous la forme d'équations mathématiques conventionnelles ou sous la forme d'algorithmes ou de structures axiomatiques ; toutes ces représentations peuvent être incluses dans une simulation sur ordinateur. »[3]

Ce qui unifie théoriquement les modèles n'est donc *pas la référence à une réalité unique* et sous-jacente, métaphysique en ce sens, et dont ils seraient chacun un reflet particulier mais c'est le fait qu'ils se prêtent *tous*, d'un point de vue cette fois-ci général et mathématique, de la *même et unique manière* à l'évaluation objective de leur similarité. Cette évaluation objective elle-même

[1] Mais la métaphore politique est absente du propos de Stahl.
[2] "There is no 'perfect model' except an identical copy, and all models are intrinsically partial models, as defined by particular similarity criteria", [Stahl, W. R., 1967c], pp. 207-208.
[3] "It would probably not be an exaggeration to state that modeling and simulation represent the most important single tools of theoretical biology. In modern science the mere verbal statement of a 'theory' is no longer considered adequate and mathematical constructs of various kinds are expected. These may be in the form of conventional mathematical equations or presented as algorithms or axiomatic structures ; all these representations may be encompassed by computer simulation", [Stahl, W. R., 1967c], p. 209.

n'absolutise pas le prototype mais absolutise plutôt le caractère nécessairement algorithmique que doit prendre le test de conformité aux critères mathématiques (donc neutres, formels, non métaphysiques) de similarité entre le prototype et le modèle. Les critères de similarité sont certes à chaque fois différents et dépendent de l'usage que l'on veut faire du modèle. Mais la *manière algorithmique* de tester la conformité du modèle à ses critères chaque fois *singuliers* est en revanche *universelle*. Pour le positiviste qu'est Stahl, il y a donc bien un *critère universel* de la similarité partielle entre un prototype et son modèle : le *test algorithmique*. Ce test est donc de nature computationnelle, mathématique et non métaphysique. Les modèles, s'ils sont relatifs à un usage, ont tous la même manière de se rapporter de façon objective à leurs prototypes. Donc il y a tout de même en eux quelque chose de commun, d'unique, et qui transcende leur essentielle relativité. La tâche d'unifier les différents types de modélisation, par-delà leur diversité, est en ce sens achevée, de ce point de vue positiviste qui est celui de Stahl.

Là-dessus cependant, même si une réduction mathématique (et donc un traitement par simulation sur ordinateur) de toute forme de modélisation lui semble en droit toujours possible, Stahl renonce à donner une interprétation mathématique complète et précise pour chacun des critères de similarité qu'il décèle dans les modèles[1]. Et c'est encore une fois le paradigme du test de Turing qui, en fait, lui offre un argument qu'il juge suffisant et qui le guide vers cette conception formelle et abstraite de la modélisation en général. Car l'invocation de cette modélisation de la pensée que l'on peut dire *a minima*, parce qu'axée uniquement sur les « performances »[2] extérieures d'une « boîte noire », semble, selon lui, suffire à montrer qu'en droit toute modélisation peut être méthodiquement ramenée à une sorte d'isomorphisme :

« Le point de vue opérationnel incarné par le test de Turing est en un sens applicable à toutes les comparaisons de modélisation. Un modèle et un prototype ne sont jamais complètement similaires à moins qu'ils ne soient identiques, mais le degré de similarité ou l'extension de la 'modélisation' est une chose fondamentalement arbitraire, définie par un critère de test spécifique qui peut (et devrait) être énoncé sous la forme d'un algorithme. Dans un modèle hydrodynamique, l'algorithme de test pourrait consister dans le fait de calculer le nombre de Reynolds, tandis que, dans le cas d'un modèle à servomécanismes, cela pourrait impliquer la comparaison, du gain [de la fonction de transfert] et des critères de stabilité de Nyquist[3] *du modèle [d'une part] et du prototype [d'autre part]. »*[4]

Plus concrètement donc, en produisant cette théorie épistémologique unificatrice en matière de modèles, Stahl espère que, comme l'ingénieur-rhéologue qui doit, dans son travail, demeurer explicitement sensible à l'invariance du nombre de Reynolds dans le passage du

[1] "Suffice it to say that modern mathematical theory can encompass all entities called 'models' in biology or technology and even the distorted transformations of skull shapes for various species shown in [d'Arcy] Thompson (1959)", [Stahl, W. R., 1967c], p. 175.

[2] "In regard to similarity criteria, the simplest approach is to disregard mechanisms and only consider "performance scores'", [Stahl, W. R., 1967c], p. 203.

[3] Harry Nyquist (1889-1976) est un ingénieur en électricité et communication. Il est américain d'origine suédoise. En 1932, en poste chez AT&T (*American Telephone and Telegraph company*), il formule la condition mathématique à laquelle les amplificateurs à feedback négatif sont stables. Cette condition, qui porte sur la fonction de transfert de l'amplificateur, est appelée « Théorème de stabilité de Nyquist ».

[4] "The operational viewpoint embodied in Turing's test is in a sense applicable to all modeling comparisons. A model and prototype are never completely similar unless they are identical, but the degree of similarity or extent of 'modeling' is a fundamentally arbitrary matter defined by a specific test criteria, which can (and should) be stated as an algorithm. In a hydrodynamic model, the test algorithm may consist of computing the Reynold's number, whereas in a servomecanism model it might involve comparing the gain and Nyquist stability criteria of the model and prototype", [Stahl, W. R., 1967c], p. 202.

prototype au modèle, le biologiste théoricien lui aussi, grâce à cette présentation systématique et explicite (parce qu'algorithmique, c'est-à-dire réductible à un ensemble fini de règles) des types d'invariance à chaque fois incriminés dans ses modèles, finira par en développer une utilisation à la fois précisément mesurée, évaluée et maîtrisée. Les modèles mathématiques de la biologie, mais également ceux qui sont applicables aux sciences physico-chimiques, de l'ingénieur ou aux sciences sociales, devraient pouvoir être ainsi comparés entre eux et l'on pourrait sortir la biologie théorique d'une certaine cacophonie méthodologique.

Pour finir, il nous faut remarquer que, sans doute parce qu'il est un des rares à avoir acquis une vision d'ensemble assez complète de la modélisation mathématique à son époque, Stahl termine la plupart de ses dernières publications par quelques pronostics mesurés dans lesquels il exprime toutefois sa certitude que l'avenir appartient aux simulations sur ordinateur à grande échelle, notamment pour les modèles de la cellule qu'il a plus particulièrement travaillés[1]. Mais, sous sa main, ces prophéties perspicaces peuvent sonner comme une sorte de testament intellectuel, car W. R. Stahl n'aura pas la chance de poursuivre ses travaux. Il décèdera en effet très prématurément, cette même année 1967. Entre-temps, Stahl avait rencontré un botaniste du nom d'Aristid Lindenmayer. Or, on dispose sur ce point d'un bref témoignage de Lindenmayer : ce dernier a été ébloui par l'inventivité de Stahl, par sa culture scientifique et par sa largeur de vue[2]. Mais même s'il sortira transformé de cette rencontre, Lindenmayer ne peut hériter exactement de la même problématique scientifique que Stahl car, pour sa part, il s'occupe davantage de biologie du développement que de biologie moléculaire : ce qui l'intéresse, c'est donc l'embryologie, la multiplication cellulaire et le développement organique. Il sera amené à frayer dans d'autres milieux scientifiques et, par conséquent, à proposer un type de modélisation mathématique, puis informatique, assez spécifique et dans un esprit proche, certes, mais différent de celui de Stahl. C'est là que sera la source majeure de ce que l'on peut appeler la deuxième convergence de la simulation sur ordinateur de la morphogenèse des plantes avec l'empirie, après celle de Cohen.

[1] [Stahl, W. R., 1967b], p. 203 et [Stahl, W. R., 1967c], pp. 208 et 209.

[2] "I had many interesting discussions with him, and I felt his early death a great loss. A theoretical biologist of very broad scope, ha was also among the first to be concerned with computational complexities of cells and organisms, as compared for instance with Turing machines", [Lindenmayer, A., 1973], p. 680, note.

CHAPITRE 18 - La simulation de la morphogenèse par automates formels : Aristid Lindenmayer (1968-1974)

À la fin des années 1960, un autre type d'appropriation des ordinateurs par la biologie des formes va donc voir le jour, notamment avec les travaux d'Aristid Lindenmayer qui seront publiés dans le *Journal of Theoretical Biology* à partir de 1968. Le type de formalisation que cette approche revendique, malgré des points communs avec celui de Dan Cohen, s'appuie en fait sur un tout autre corpus de biologie théorique et surtout sur une tout autre interprétation de ce que signifient la mathématisation, la formalisation et la théorisation en biologie. Alors que sa problématique embryologique et développementale semble très proche de celle de Cohen, puisqu'il est biologiste comme lui, Lindenmayer n'utilise pas du tout l'ordinateur de la même façon que lui : il cherche au contraire à éviter toute « simulation » au sens stochastique alors même que Cohen met cet usage en avant pour la biologie théorique des formes. Il y a donc là une énigme à tenter de résoudre.

Un botaniste convaincu par le positivisme logique : la « théorie des cycles de vie »

Pendant l'année universitaire 1963, le botaniste Aristid Lindemayer (1925-1989), suédois d'origine, et rattaché à ce moment-là au *Queens College* de la *City University* de New York, se trouve à Londres, auprès de Joseph Henry Woodger. Il a été invité à l'occasion d'une bourse universitaire qui lui a été délivrée par la *National Science Foundation* britannique. Woodger a donc 69 ans lorsqu'il reçoit Lindenmayer chez lui. Woodger n'exerce plus comme enseignant. Et ses interventions sont depuis longtemps essentiellement d'ordre philosophique. Lindenmayer, en poste aux Etats-Unis a pourtant eu vent de ses travaux. Il veut avoir un rapport intellectuel et personnel suivi avec Woodger et ses élèves. Pendant cette période, le centre d'intérêt biologique de Lindenmayer se porte sur ce que, selon une idée qui lui était venue en discutant avec le botaniste américain Ralph O. Erickson (né en 1914) alors professeur à l'Université de Pennsylvanie (« Penn », Philadelphie), il appelle la « théorie des cycles de vie » (« *theory of life cycles* »)[1]. Indiquons ici brièvement qu'Erickson est à cette époque un botaniste reconnu, officiant notamment aux côtés de l'écologue Robert Mac Arthur comme auprès du physiologiste des plantes David Rockwell Goddard (1908-1985). Depuis 1946, Erickson est en effet responsable du laboratoire de biologie du développement du département de botanique de l'Université Penn : dans les années 1950, en particulier sous l'impulsion de Goddard (qui deviendra directeur du département en 1956), il avait d'abord travaillé à expliquer la morphogenèse des plantes en des termes physiologiques (par le métabolisme) et biochimiques. Mais, progressivement, en partie à cause des échecs relatifs rencontrés en ce domaine, sauf dans de rares cas comme dans l'étude particulière de la croissance de certains pollens ou dans celle des racines du maïs, mais aussi et surtout parce que Goddard quitta l'Université Penn et donc ses collègues pendant quelques temps pour enseigner comme professeur invité à l'Université de Cambridge, en Angleterre, Erickson avait finalement été de ceux qui, contre l'approche statistique classique des problèmes de croissance (axée essentiellement, comme on l'a vu, sur les phénomènes moyens et concentrée surtout au niveau déjà élevé de l'organe), commencèrent à promouvoir l'approche théorique de la

[1] [Lindenmayer, A., 1964], p. 417.

morphogenèse par le traitement du comportement individuel des cellules[1]. De telles approches pouvaient lui sembler en effet plus prometteuses dans la mesure où l'on serait alors à même de suivre la génération et la filiation des cellules au niveau cellulaire même, leur « cycle de vie », sans plus niveler leurs comportements localement différenciés. Mais l'outillage mathématique et formel manquait en l'occurrence. Et, pour sa part, Erickson ne disposait pas d'une formation qui le prédisposait à une inflexion fondamentale de son approche de la morphogenèse en ce sens. C'est la raison pour laquelle, à partir de 1965, il adoptera plutôt le formalisme des équations aux dérivées partielles pour tâcher de rendre compte de ces comportements morphogénétiques localement différenciés. Nous reviendrons sur son cas plus largement lorsqu'il sera question d'évoquer l'arbitrage qu'un botaniste français devra précisément faire, en 1973, entre l'approche analytique d'Erickson et l'approche logiciste de Lindenmayer.

En 1964, en tout cas, c'est Lindenmayer qui le premier suggère un formalisme alternatif, exhumant en cela l'approche logiciste antérieure de Woodger. L'orientation épistémologique comme les compétences mathématiques singulières de ce botaniste vont donc grandement présider à la naissance d'un nouveau formalisme qui s'avèrera, dès ses débuts, particulièrement adapté à la simulation sur ordinateur. Mais c'est donc d'abord dans le but clairement théorique de développer une « théorie des cycles de vie » que Lindenmayer fait sa proposition. Essayons de comprendre ici ce qui, dans la perspective biologique qu'il adopte, peut préférentiellement l'inciter à faire naître un formalisme capable d'exprimer nouvellement et assez généralement le phénomène de morphogenèse des arborescences.

Avec l'expression « cycles de vie », rappelons en premier lieu qu'il s'agit, pour les biologistes, de désigner les différents cycles possibles, et réellement rencontrés dans la nature, de genèse de noyaux cellulaires ou de cellules complètes à partir d'autres noyaux ou d'autres cellules. Par observation et expérimentation, on sait qu'il existe en effet seulement trois grands processus élémentaires qui peuvent donner naissance à un nouveau noyau cellulaire ou à une nouvelle cellule : la mitose, la méiose et la fusion gamétique[2]. L'histoire de toute cellule ou de tout noyau cellulaire, et par extension de tout être vivant de par son organogenèse, semble ainsi pouvoir être décrite uniquement par une combinaison particulière de ces trois processus successifs à partir d'une cellule primitive ou d'un noyau initial[3]. Or, il se trouve que Lindenmayer est particulièrement au fait de ces questions parce qu'il est originellement un spécialiste des champignons et des algues. Il faut en effet rappeler que ce sont les algues qui présentent sans doute l'une des plus grandes diversités de types de reproductions cellulaires. Le cycle peut y être monogénétique, par exemple, c'est-à-dire que la fusion gamétique produit directement un individu porteur lui-même de gamètes, comme chez les animaux. Mais certaines algues se comportent parfois au contraire comme les végétaux, dans le sens où elles présentent une alternance morphologique dans leurs générations. Leur cycle est alors nommé digénétique. Dans ce dernier cas, la fusion gamétique ne donne pas immédiatement lieu à une plante sexuée mais à un individu

[1] Voir [Lück, H., 1975], p. 24.

[2] À titre de rappel, voici les définitions cursives du dictionnaire Robert, Tome 1, édition 1970 : mitose : « division indirecte de la cellule où chaque chromosome se coupe en deux avant la division du corps cellulaire » ; méiose : « division de la cellule par séparation des paires de chromosomes du noyau qui assure le passage du stade diploïde au stade haploïde et forme les gamètes ». La fusion gamétique est la fécondation qui intervient lors d'un cycle de vie sexué.

[3] En conformité avec le principe de la biologie attribué au pathologiste allemand Rudolf Virchow (1821-1902) (*Arch. Path. Anat. Physiol.*, 1855) et selon lequel « *omnis cellula e cellula* » (« toute cellule vient d'une cellule »). C'est Lindenmayer lui-même qui rappelle cette référence *in* [Lindenmayer, A., 1964], p. 444. Voir une confirmation et des précisions sur l'établissement définitif de la théorie cellulaire dans l'article de M. Caullery et J.-F. Leroy *in* [Taton, R., 1961, 1995], p. 398.

dont les cellules reproductrices sont des spores. Ce n'est qu'ensuite, en germant, que ces spores deviendront des individus sexués[1].

C'est de ce genre d'alternance, à la fois biologique et logique, que Lindenmayer ambitionne de faire une véritable *théorie déductive*. Et c'est à ce moment-là qu'il rencontre les travaux antérieurs de Woodger. Ce dernier avait proposé une méthode axiomatique qui, selon Lindenmayer lui-même, donnait les premiers outils logiques et mathématiques susceptibles de servir à cette entreprise. Il faut comprendre que, plus qu'une autre, l'approche logiciste de Woodger séduit Lindenmayer parce qu'elle autorise le langage formel à *ne pas prendre en considération* les complications cytologiques et biochimiques qui interviennent lors de chacun de ces trois processus, contrairement aux approches antérieures de la croissance par Goddard et Erickson, par exemple. S'il s'agit de construire théoriquement une logique des alternances de générations cellulaires ou nucléaires, il lui apparaît en effet nécessaire de ne pas prendre en considération les niveaux inférieurs comme celui qui concerne le comportement des chromosomes[2] par exemple. Afin de produire une théorie correctement formalisable et manipulable, il est selon lui souhaitable de faire abstraction de ces autres niveaux où interviennent des concepts morphologiques, physiologiques ou génétiques[3]. Il s'agit de se concentrer seulement sur ce que Lindenmayer appelle les « événements cardinaux » (« *cardinal events* »[4]) des cycles de vie. Or, ce qui l'incite à adopter une telle vision formaliste au sujet de la théorie en biologie vient incontestablement du fait qu'il partage quelques unes des options de Woodger et du positivisme logique sur la notion de théorie scientifique. Aussi, dans son article de 1964 (de 54 pages !), comme Woodger en 1936, ou comme MacCulloch et Pitts dans leur article de 1943, a-t-il le front de ne donner qu'une très courte bibliographie, où seules trois références logicistes figurent mais aucune référence botanique ! Ces références sont *Introduction to Symbolic Logic and its Application* de Rudolf Carnap, les *Principia Mathematica* de Whitehead et Russell et *The Axiomatic Method in Biology* de Woodger[5]. Il se trouve qu'il connaît bien par ailleurs les idées précises de Woodger sur la construction des théories scientifiques : « Les théories sont considérées dans la logique moderne comme des langages. »[6] Il cite même en épigraphe un passage de son *Biology and Language* (Woodger - 1952) :

« … pour la poursuite de l'activité biologique, le langage est simplement un outil aussi indispensable que les microscopes, les kymographes[7] et autres instruments. Si les observations sont impossibles sans ceux-ci, leur enregistrement et la construction des hypothèses ne sont pas moins impossibles sans les autres. (J. H. Woodger, Biology and Language, *1952). »*[8]

---

[1] Pour ces précisions, nous nous sommes appuyé sur l'article « algues » de Jean Feldmann, paru dans l'*Encyclopaedia Universalis*, 1989, version CD-ROM de 1995, Tome 1, pp. 822a-822c.
[2] [Lindenmayer, A., 1964], p. 469.
[3] [Lindenmayer, A., 1964], p. 469.
[4] [Lindenmayer, A., 1964], p. 465.
[5] Il est vrai qu'il s'agit d'un chapitre publié dans le recueil d'hommage à Woodger à l'occasion de ses 70 ans. Le lectorat potentiel est donc autant, si ce n'est davantage, philosophe que biologiste.
[6] "Theories are considered in modern logic as languages", [Lindenmayer, A., 1964], p. 416.
[7] Le kymographe est un instrument employé en physiologie et mis au point en 1846 par le physiologiste allemand Karl Ludwig (1816-1895). C'était un perfectionnement de l'hémadynamomètre de Poiseuille (ou machine à mesurer le flux sanguin : voir *supra*) dans la mesure où l'on pouvait y lire sur un cylindre enregistreur les différentes valeurs relevées par l'hémadynamomètre. Voir le chapitre de J. Piveteau *in* [Taton, R., 1961, 1995], pp. 476-477 et 481.
[8] "…language is just as indispensable a tool for the pursuit of biology as microscopes, kymographs and other instruments. If observations are impossible without the one, their recording and the construction of hypotheses are non less impossible without the others. (J. H. Woodger, *Biology and Language*, 1952) ", [Lindenmayer, A., 1964], p. 416. À comparer par exemple avec [Carnap, R., 1934, 1937, 2002], p. 7 : "The *logic of science* (logical methodology) is nothing else than the *syntax of the language of science*." C'est l'auteur qui souligne.

Autrement dit, toute théorie est un type particulier de langage formel servant à la consignation des faits observables et à la déduction syntaxique (à l'intérieur de ce langage donc) de la représentation symbolique de ces mêmes faits ou d'autres, dits prévisibles, à partir de notions primitives et de postulats ou règles axiomatiques. C'est bien là un article de foi positiviste au sens strict du positivisme logique de Carnap. Lindenmayer reprend d'ailleurs directement à Carnap, d'une part la distinction entre syntaxe et sémantique, d'autre part l'idée qu'en conséquence de cette distinction, la science, pour parler sensément (sémantiquement) du monde des phénomènes, doit établir également des règles de correspondances entre les observations et les symboles du formalisme, c'est-à-dire entre la sémantique ou la signification des concepts symbolisés dans le langage et les concepts théoriques intervenant dans les propositions formelles de la théorie[1]. Ces règles sont appelées « règles sémantiques »[2] par Lindenmayer.

Cependant, s'il n'y avait que cette caractérisation, il n'y aurait pas la possibilité de choisir entre différentes théories. Or, selon Lindenmayer, il existe un critère simple pour sélectionner une théorie formelle au milieu de plusieurs autres théories concurrentes : le critère de la « puissance »[3]. Une théorie est puissante lorsqu'elle a besoin d'un nombre minimum de règles formelles pour atteindre, par déduction syntaxique (ou « calcul » selon le terme que Lindenmayer reprend aussi à Carnap[4]) la symbolisation d'un maximum de faits observés. Il semble que ce critère lui ait été en revanche soufflé par Woodger lui-même lors de son séjour à Londres, puisque ce dernier avait longtemps médité sur la construction des théories à partir d'une telle perspective positiviste[5]. Toujours est-il que Lindenmayer tient ses trois notions primitives (mitose, méiose, fusion gamétique) ; et il ne lui reste plus qu'à tâcher de produire les postulats ou axiomes nécessaires pour déduire formellement les différents types de cycles de vie observés dans la nature par les biologistes. Pour achever ce travail minutieux et purement théorique, Lindenmayer a également eu besoin de tout l'été 1963. Et pour lui permettre une telle prolongation de son voyage d'études, il a aussi reçu l'appui financier de l'Université de Pennsylvanie (de par l'implication de Ralph O. Erickson) et une subvention du *U.S. Public Health Service* (*via* le *North Carolina State College*) au titre des études en biomathématiques[6].

Après avoir défini ses symboles et rappelé quelques théorèmes élémentaires des *Principia Mathematica* ou de la logique symbolique de Carnap et dont il se servira en effet, Lindenmayer insère dans ses axiomes spécifiques certaines des règles biologiques bien connues par les biologistes, notamment les botanistes, au sujet de la succession et de la combinaison des trois processus élémentaires de génération. Certaines combinaisons sont en effet impossibles ou interdites. Une remarque importante doit alors être faite : lorsqu'on fait abstraction du matériel biologique qui intervient dans chacun de ces processus, il est possible, selon Lindenmayer, de se les représenter comme autant de relations formelles multilatérales[7], c'est-à-dire comme autant de relations d'un à plusieurs ou de plusieurs à un : la relation mitotique est ainsi une relation d'un à

[1] [Lindenmayer, A., 1964], p. 416.
[2] "semantic rules", [Lindenmayer, A., 1964], p. 416.
[3] "The fewer rules a theory has and the more observations it can account for, the more powerful we would consider it to be", [Lindenmayer, A., 1964], p. 416. Voir également [Lindenmayer, A., 1964], p. 469 : "Much more powerful theoretical concepts might be needed to cope with biological complexities, and if this exercise helps to prepare the way towards them, it serves its purpose."
[4] Voir [Lindenmayer, A., 1964], p. 416 et [Carnap, R., 1934, 1937, 2002], §2, pp. 4-9.
[5] Voir son *The technique of theory construction*, publié à la maison d'édition du Cercle de Vienne : *International Encyclopaedia of Unified Science*, vol. 2, n°5, Chicago, 1939 (cité *in* [Gregg, J. R. et Harris, F. T. C., 1964], p. 473).
[6] [Lindenmayer, A., 1964], p. 417.
[7] Nous employons ce terme bien qu'il ne figure pas en anglais de terme générique. Il s'agit de désigner par là toutes formes de relations entre individus qui ne soient pas binaires, c'est-à-dire seulement bilatérales.

deux, la relation méiotique est une relation d'un à quatre et la fusion gamétique est une relation de deux à un[1]. La théorie de Lindenmayer entend donc bien traiter ce que nous avons compris comme étant une des difficultés[2] majeures qui caractérisent la vie organique et son développement : le fait que les relations y sont rarement binaires. À ce stade-là, on peut déjà comprendre que, du point de vue de la génération cellulaire ou même du développement organique des métazoaires, la théorie de la combinaison des cycles de vie semble avoir les moyens de donner une représentation formelle plus adéquate.

Axiomatique inutilisable et axiomatique utilisée

Pour cela, Lindenmayer reprend en modifiant légèrement, mais de façon décisive, l'axiomatique des relations entre cellules de Woodger[3]. Tout d'abord, et cela est d'importance, il renonce tout à fait aux concepts de « tranche » organique (« *slice* ») dans la mesure où Woodger, on s'en souvient, y concevait une délimitation *à la fois* spatiale et temporelle. Cette perspective trop généreuse, trop générale *a priori*, s'avère jeter de la confusion en ne décidant pas de la dimension qui pourrait prendre un sens biologique dans la théorie. Pour l'axiomatique de Woodger, écrit Lindenmayer, « le zygote à partir duquel un animal se développe et les gamètes auxquelles il donne naissance, aussi bien que les cellules intermédiaires, toutes ces cellules sont des parties du même organisme entier »[4]. Partant de cette définition quelque peu surréaliste de Woodger pour la relation organique « partie de … », il est dès lors très difficile d'insérer ensuite de façon commode, c'est-à-dire praticable sémantiquement, les nécessaires restrictions qui peuvent donner une réelle signification biologique à certains types de partitions d'un organisme réel. Nous commentons ce point précis, essentiel, avant de poursuivre.

En proposant cette modification dans l'axiomatique de Woodger, Lindenmayer nous fait donc apparaître ceci : Woodger, en formalisant de très haut et en général l'objet biologique (d'une façon en fait quelque peu anthropocentrique) afin, croyait-il, de ne rien laisser échapper dans ces symboles formels qui soit un jour ou l'autre susceptible d'une interprétation biologique, c'est-à-dire pour lui d'une observation, a proposé un style de découpage du réel biologique pratiquement inutilisable tel quel. C'est bien la grande leçon que Lindenmayer donne à Woodger. Pour rendre praticable l'axiomatique de Woodger, Lindenmayer se contente en fait de se passer de la relation dite « avant dans le temps » que Woodger était toujours obligé de combiner à ses symboles de « tranches » organiques pour produire des propositions biologiquement sensées[5]. Plus précisément, Lindenmayer considère que ses trois relations élémentaires sont de toute façon « irréflexives » (« *irreflexive* »[6]) au sens mathématique : par exemple, un zygote né d'une fusion gamétique ente deux individus ne peut pas, de par la définition même de la seule relation de genèse gamétique qu'il se donne[7], faire naître un des deux individus qui l'a fait naître.

Ainsi, une fois qu'elles sont ordonnées les unes aux autres selon une combinaison précise des trois processus élémentaires de génération, les parties organiques que le système formel considère sont *en même temps* temporellement ordonnées : il n'y a nulle besoin de rajouter une

[1] [Lindenmayer, A., 1964], p. 434.
[2] Déjà reconnue par Waddington et par Rashevsky ou Rosen, mais sans qu'il ne les cite.
[3] Voir [Woodger J. H., 1937], section 4, pp. 85-86.
[4] "Thus, e. g., the zygote from which an animal develops and the gametes to which it gives rise, as well as the cell in between, are all parts of the same whole organism", [Lindenmayer, A., 1964], p. 466.
[5] [Lindenmayer, A., 1964], p. 434.
[6] [Lindenmayer, A., 1964], p. 466. C'est-à-dire que s'il est vrai que x R y, il est faut que y R x.
[7] Nous ne rentrerons pas dans le détail. Voir le postulat 1.04 *in* [Lindenmayer, A., 1964], p. 438.

formalisation du temps qui rendrait la démonstration des théorèmes impraticable. Ce faisant, Lindenmayer parvient en effet à prouver des théorèmes valant pour les « cycles de vie » car il a auparavant bien davantage restreint et contraint la forme de son axiomatique à cette fin. Il l'a même calibrée directement sur le type de parties organiques (et donc de partition) qui l'intéresse. On comprend dans ces conditions qu'il n'ait pas de mal à éviter la difficulté insoluble qu'il y aurait à tenter de restreindre *a posteriori* l'axiomatique trop générale et surplombante de Woodger : en fait, il la met de côté dès le départ. La contrepartie de ce choix liminaire tient bien sûr au caractère désormais non généralisable pour la biologie de la nouvelle axiomatique proposée. La perspective théorique et de surplomb de Woodger est abandonnée.

Pour terminer, Lindenmayer adapte à sa problématique une notion qui lui vient également de Woodger : les « relations hiérarchiques ». Une relation R est dite hiérarchique lorsqu'elle est une relation de un à plusieurs et lorsque tous les membres de son domaine converse[1] sont accessibles à partir d'un seul individu x, dit « débutant » (« *beginner* »), par simple itération de cette relation (R, R^2, … , R^i, …)[2]. On voit ici l'analogie avec la croissance d'un être vivant à partir d'une cellule. Lindenmayer s'intéresse alors aux organismes qui, en ce sens, peuvent être représentés par une combinaison de mitoses et de méioses enchaînées à partir d'un seul individu débutant : ce sont ces organismes dont la représentation initiale par combinaison de tels processus élémentaires peut être ensuite *réduite* à une relation hiérarchique. Les autres se développent par greffes ou par agrégations de cellules, comme les moisissures ou champignons de vase (« *slime molds* »[3]). Ils ne présentent pas de relations hiérarchiques parce que leurs cellules dérivent de plusieurs « débutants »[4]. De cette manière, un organisme multicellulaire « peut être désigné comme une classe de paires ordonnées de cellules mères et de cellules filles »[5]. Lindenmayer appelle cela une « hiérarchie de division » (« *division hierarchy* »). De ce point de vue là, une organisation hiérarchique sociale comparable à un organisme est l'armée, par exemple, car la chaîne de commandement peut y être reconstruite pas à pas au moyen d'une relation hiérarchique élémentaire R de commandement direct. Lindenmayer rappelle également que le terme même de « hiérarchie » provient originellement de la relation entre les anges dans la théologie chrétienne, et qu'il a valu ensuite pour désigner la structure de l'Etat féodal[6]. En insistant sur ces analogies entre structures relationnelles, Lindenmayer nous montre que c'est d'abord la métaphore religieuse et politique qui lui vient à l'esprit lorsqu'il cherche à construire une théorie logiciste des cycles de vie qui soit applicable au développement d'un être multicellulaire. Ainsi, à cette date-là tout au moins, il ne semble pas qu'il ait à l'esprit la métaphore du langage telle qu'elle aurait pu également lui apparaître s'il avait été au fait des travaux linguistiques de Chomsky (1957) sur les grammaires génératives, comme on le dit souvent.

Pour finir sur cette première théorie de Lindenmayer, il faut noter que sa publication dans un chapitre de l'ouvrage collectif de philosophie des sciences en hommage à Woodger n'a pas beaucoup fait pour sa renommée ultérieure, notamment auprès des biologistes théoriciens : peu ont dû en être informés[7]. À notre connaissance, elle ne sera pas relayée ni prolongée telle quelle,

---

[1] Ou tous ses antécédents en terme fonctionnel, c'est-à-dire tous les y ou z tel qu'il existe x, tel que x R y est vraie ou x R (y,z) est vraie.
[2] Nous adaptons cette définition de [Lindenmayer, A., 1964], p. 450.
[3] [Lindenmayer, A., 1964], p. 466.
[4] On n'a donc pas affaire à un arbre au sens de la théorie des graphes.
[5] "a particular multicellular organism can be designated as a class of ordered pairs of mother and daughter cells", [Lindenmayer, A., 1964], p. 451.
[6] [Lindenmayer, A., 1964], p. 451.
[7] [Stahl, W. R., 1967c] nous paraît une des rares exceptions en ce domaine. Il ne cite cependant que globalement l'ouvrage collectif de 1964 sur Woodger mais pas le chapitre particulier de Lindenmayer qui s'y trouve alors même qu'il

même par Lindenmayer. Il ne s'y réfèrera d'ailleurs jamais par la suite, sauf dans l'article séminale de 1968[1], car il considèrera plus tard que c'est seulement à partir de 1968 que ses premières véritables contributions à la biologie théorique parurent. Que se passe-t-il en effet de particulier cette année-là ?

De la théorie logiciste à la théorie des automates en passant par l'exobiologie

En fait, il faut remonter aux années 1966-1967 pour le savoir. Pendant cette période, Lindenmayer est toujours professeur de biologie et chercheur dans le Département de Biologie du *Queens College* de la *City University* de New York. Il continue ses travaux de recherche à l'aide d'une subvention des *National Institutes of Health* eux-mêmes rattachés au *U.S. Public Health Service*. Ce qui d'ailleurs fait des *National Institutes of Health* une institution pionnière dans ce type de recherche, puisqu'on se souvient qu'ils avaient auparavant soutenu les travaux initiés par Murray Eden et Dan Cohen, quelques années auparavant. Le centre d'intérêt de Lindenmayer se porte toujours sur les algues et leur développement au sens des « cycles de vie » mais aussi au sens de la biologie du développement, c'est-à-dire notamment au sens morphogénétique. À ce titre, Lindenmayer, à la grande différence de Woodger, par exemple, dirige un véritable laboratoire de biologie où la pratique expérimentale a toute sa place[2]. Or, dans les trois années qui le séparent de sa proposition d'une « théorie des cycles », Lindenmayer a été informé de l'existence de la théorie des automates[3], notamment par John Richard Gregg, alors professeur de génétique et de biologie théorique à la *Duke University* et fidèle collaborateur de Woodger[4]. Gregg lui donne ainsi l'idée qu'il pourrait peut-être avoir recours à ce nouveau formalisme pour la représentation du développement organique.

Il est cependant un autre événement important qui va en partie décider de la conversion définitive de Lindenmayer aux formalismes des automates. En 1967 en effet, la NASA lui demande d'encadrer des recherches prioritaires qui doivent débuter à l'Institut de Biologie Théorique mis en place à Fort Collins (Colorado), et cela à destination des étudiants débutants ou licenciés (« *undergraduates* »). L'objet principal de cet Institut est en fait de promouvoir, dans l'esprit des méthodes de la cybernétique et de la théorie des automates, les recherches en exobiologie (vie extraterrestre) et d'inciter ainsi les étudiants à s'orienter assez tôt vers ce domaine[5]. Dans ce cadre-là, c'est Ross Ashby qui a été choisi par la NASA pour faire figure de leader : il y sera chargé d'un séminaire d'introduction à la cybernétique. Lindenmayer, de son côté, doit venir avec des assistants de recherche. Il se fait alors accompagner par deux de ses élèves les plus motivés des semestres précédents : Andrew Schauer et Jerome C. Wakefield[6]. C'est là qu'il lui est demandé et qu'il s'impose lui-même, et avec scrupule, de décortiquer toute la littérature récente

---

aurait pu faire figurer cette modélisation de Lindenmayer dans sa catégorie des modèles abstraits, algorithmiques et axiomatiques.

[1] [Lindenmayer, A., 1968a], pp. 286 et 299.

[2] Cette information nous est confirmée par une communication personnelle (courrier électronique) de Jerome C. Wakefield du 30 septembre 2003.

[3] "I am also indebted to John R. Gregg for his having introduced me to automata theory in the first place", [Lindenmayer, A., 1971], p. 678.

[4] Voir [Gregg, J. R. et Harris, F. T. C., 1964], p. 4. John R. Gregg a publié en 1954 *The Language of Taxonomy. An application of symbolic logic to the study of classificatory systems*, New York, Columbia University Press.

[5] D'après une communication personnelle (courrier électronique) de Jerome C. Wakefield, en date du 29 septembre 2003.

[6] En 1967, Jerome C. Wakefield disposait déjà d'une formation initiale en philosophie, mathématique et psychologie. Il deviendra par la suite psychologue et il se fera connaître en travaillant en intelligence artificielle, notamment aux côtés d'Hubert Dreyfus dont il partagera les vues critiques.

sur la modélisation de la vie par automates, en particulier sous l'impulsion des espoirs donnés par les livres d'Ashby dont *Design for a Brain* paru en 1952 et *Introduction to Cybernetics* paru en 1956. Avec Schauer et Wakefield, Lindenmayer lit donc cette toute récente littérature qui se trouve justement à disposition. Rappelons en effet qu'en 1966, sous la direction d'Arthur W. Burks, une édition posthume des travaux de von Neumann sur les automates cellulaires paraît également. Ce qui contribue à rendre ces recherches sur les automates véritablement accessibles au plus grand nombre. Lindenmayer lit donc très rapidement ces ouvrages et aperçoit ainsi les bases théoriques qui sous-tendent les automates[1]. Pendant les années 1965-1967, avec ses étudiants du *Queens College* de la *City University*, comme Schauer et Wakefield, il avait certes déjà travaillé de longs mois sur des variantes du modèle de Pitts et McCulloch de 1943 mais sans opter directement pour la représentation intégralement discrétisée. C'est donc dans le contexte de l'institut de Fort Collins qu'il complète sa connaissance des travaux de modélisation par automates. Et c'est à ce moment-là très probablement que Lindenmayer est informé des premiers travaux de Walter R. Stahl, même s'ils commencèrent à être publiés plus tôt, dès 1963. Là encore, c'est peut-être John R. Gregg, du fait de sa spécialisation en génétique et biologie moléculaire, ou bien Ashby qui, le premier, lui a fait connaître ces travaux de modélisation algorithmique moléculaire et de simulation.

Mais c'est plus probablement encore un livre important, qui paraît également en 1966, qui les lui fait connaître : *Cybernetics and Development*. Ce livre de synthèse est écrit par un zoologiste et psychologue anglais, Michael J. Apter. Apter avait eu un parcours mouvementé et de fait très interdisciplinaire. Auparavant, à l'Université de Bristol, il avait soutenu un PhD sur les rapports entre cybernétique et biologie du développement. Il avait d'abord travaillé dans le Laboratoire de Zoologie de l'embryologiste Lewis Wolpert, situé au King's College de l'Université de Londres, à l'époque où celui-ci étudiait de manière expérimentale, et au niveau cellulaire, la morphogenèse de l'embryon d'oursin[2]. Par la suite, Apter avait rejoint le Département de psychologie de l'Université de Bristol où l'automaticien Frank Honywill George l'initia à la cybernétique. C'est à ce moment-là que pour sa thèse, il fut réorienté vers les modèles de la biologie du développement par le professeur J. L. Kennedy du Département de psychologie de l'Université de Princeton[3]. Le but était de tirer des leçons, pour la psychologie, des nouveaux modèles cybernétiques qui se proposaient alors, quoique timidement, à la biologie du développement. À cette époque, selon lui, l'approche cybernétique permettait de dépasser aussi bien le mécanisme physicaliste que le vitalisme. Les deux approches antérieures qui ont essayé de régler de manière formelle le problème du caractère indécomposable des phénomènes biologiques avaient, d'après lui, échoué :

« Une approche a été celle de la biophysique mathématique, un champ auquel on associe en particulier le nom de Rashevsky et son école. Mais tandis que leur travail a été de la première importance et tandis qu'ils ont trouvé possible une description physique précise des systèmes vivants, la généralité qu'ils ont atteinte a été celle de la physique et non de la biologie. Ainsi que Wiener l'a dit :

[1] Voir [Lindenmayer, A., 1968a], p. 283.
[2] Voir [Apter, M. J., 1966], pp. x (preface), 39 et 53. Au début des années 1960, Wolpert renouait avec la « mécanique développementale » de Wilhelm Roux. Il avait montré que des changements physiques simples provoqués sur l'embryon d'oursin pouvaient avoir des conséquences de nature physique sur l'organisme.
[3] Egalement cité par [Lindenmayer, A., 1968a], pp. 283 et 299. Voir un bref exposé des idées de Apter *in* [Keller, E. F., 1995, 1999], pp. 129-130.

'Remarquons que ce groupe a beaucoup contribué à diriger l'attention des esprits versés dans les mathématiques vers les possibilités des sciences biologiques, bien qu'il pourrait apparaître à quelques uns d'entre nous qu'ils sont trop dominés par des problèmes d'énergie et de potentiel et par les méthodes de la physique classique pour faire le meilleur travail dans les études de systèmes comme le système nerveux qui sont très loin d'être clos d'un point de vue énergétique.'[1]

D'autres biologistes ont suivi des lignes de pensée différentes, comme Woodger, en cherchant d'autres systèmes formels que ceux des mathématiques pour le même dessein, ou, comme Sommerhoff[2]*, en tentant d'utiliser les mathématiques d'une nouvelle manière.* »[3]

Pour Apter, seule la cybernétique proposait une conceptualisation formelle (la rétroaction négative) qui permettait une explication générale non-vitaliste de ce qui affecte les êtres vivants à côté des machines téléonomiques. La réussite de Monod et Jacob en était un signe. Malgré leurs dires, Rashevsky, Woodger et Sommerhoff en restaient donc à la *description* alors que la cybernétique promettait l'*explication*. Pour préciser ce point, Apter s'appuyait explicitement sur la distinction que faisaient les positivistes logiques depuis les années 1930 entre syntaxe et sémantique[4] : la cybernétique proposait un principe général et formel au niveau syntaxique ; et elle était aussi un réservoir de modèles particuliers, valant au niveau sémantique donc. C'est la notion de modèle qui était donc brandie ici. Mais le rêve de principes biologiques généraux était plus que jamais conservé : « Les organismes en développement sont des systèmes excessivement complexes, qui peuvent seulement être compris, finalement, en termes de principes généraux d'organisation et de contrôle. »[5] Dans un esprit organiciste, l'accent porté sur l'interprétation syntaxique de la cybernétique avait donc surtout la fonction spéculative chez Apter, un peu comme chez Stahl, de conserver une valeur à la recherche de principes généraux mais d'éviter à la fois le physicalisme, le pur descriptivisme (qu'il qualifie de science « baconienne »[6]) et le vitalisme.

Après une réflexion épistémologique donc assez fournie et une synthèse assez complète sur la cybernétique et sur la biologie du développement, Apter proposait son propre modèle pour lequel il adoptait une vision proche de Waddington : l'organisme en genèse est comparable à un

---

[1] Wiener, N. : *Cybernetics : or Control and Communication in the Animal and the Machine*, John Wiley, New York, 1961, 2nd ed., p. 13 ; références données par [Apter, M. J., 1966], p. 27.

[2] En 1950, un anatomiste du Trinity College, Gerd Sommerhoff, proposa en effet ce qu'il appelait une *Biologie Analytique*. Il s'agissait pour lui de rendre compte par des fonctions analytiques de la grande quantité des termes biologiques décrivant un comportement dirigé : la psychologie pouvait ainsi être conçue dans la continuité de la biologie. Voir [Sommerhoff, G., 1950]. Comme Apter, il fit partie, par la suite, du groupe de cybernéticiens (majoritairement britanniques) nommé ARTORGA : *The Artificial Organisms Research Group*. Ce groupe vécut de mars 1958 à décembre 1974. Le comité scientifique était notamment constitué de Ross Ashby mais aussi de Heinz von Foerster. Il regroupait des psychologues, des physiologistes, des spécialistes des sciences sociales et du comportement. Pour ces éléments d'histoire, voir [Cordeschi, R. et Numerico, T., 2003].

[3] "One approach has been through mathematical biophysics, a field with which one associates in particular the name of Rashevsky and his school. But while their work has been of the first importance and precise description of living systems has been found possible in mathematical terms, the generality attained has been that of physics and not of biology. As Wiener has said : 'Let it be remarked that this group has contributed much to directing the attention of the mathematically minded to the possibilities of the biological sciences, although it may seem to some of us that they are too dominated by problems of energy and potential and the methods of classical physics to do the best possible work in the study of systems like the nervous system, which are very far from being closed energetically.' Other biologists have thought along different lines either, like Woodger by searching for other formal systems than those of mathematics for the same purpose, or, like Sommerhoff by attempting to use mathematics in new ways", [Apter, M. J., 1966], pp. 4-5.

[4] Il cite la publication du philosophe américain C. W. Morris, proche de Carnap : *Foundations of the theory of signs* de 1938.

[5] "Developing organisms are excidingly complex systems, which can only be understood finally in terms of general principles of organisation and control", [Apter, M. J., 1966], p. 33.

[6] [Apter, M. J., 1966], p. 24.

réseau complexe de régulations représentables formellement par des automates auto-reproducteurs en interaction[1]. La nouveauté qu'il apportait consistait en ce choix de discrétiser l'approche de Waddington. C'est qu'il recherchait des modèles sémantiques « effectifs », c'est-à-dire toujours calculables et susceptibles de prédire le comportement dynamique d'un tout à partir de la description du comportement de ses parties[2] : le formalisme des automates l'intéressait pour cette raison. Deux des huit chapitres du livre étaient donc plus précisément consacrés aux emplois des automates auto-reproducteurs dans la représentation des formes et du développement. L'auteur y faisait une revue des travaux existants en ce domaine : ceux de von Neumann (1949-1951), de Ulam (1962), de Stahl (1963), de Eden (1967) et les siens propres[3]. Apter reprenait notamment la notion de « *Pattern Formation* » à Waddington pour tâcher de modéliser théoriquement la formation de structure sur un tissu cellulaire unidimensionnel proche de la géométrie d'une Hydre. Il représentait les cellules biologiques par des automates de type Turing : les cellules mises bout à bout changeaient leur *état* et l'*information* qu'elles faisaient passer à leur voisines était fonction de leur *état* présent et des *informations* qu'elles recevaient elles-mêmes de la gauche et de la droite. Elles portaient toutes les mêmes règles : en cela, elles disposaient d'un « génotype » commun, selon le terme d'Apter. Mais leur état changeait : c'était leur « phénotype »[4] variable. Les cellules ne donnaient donc pas naissance à d'autres cellules. Le tissu ne croissait pas : comme dans le modèle de Turing (1952), il était supposé préexister. Mais il y avait communication entre cellules et Apter montrait, en faisant les calculs à la main, qu'il y avait stabilisation d'une certaine hétérogénéité par rapport à la distribution des différents états internes des cellules. Son modèle pouvait donc être apparenté à celui de Turing (1952) bien qu'il ait fait le saut de l'approche discrétisée dès le départ.

En 1967 donc, Lindenmayer a beaucoup lu, notamment Apter, mais aussi les travaux de Robert Rosen de 1964 dans lesquels ce dernier reprenait son premier formalisme de 1958 pour ajouter la notion d'« état » (« *state* ») à ses automates afin d'en faire de véritables « machines séquentielles » au sens de la machine de Turing. Le formalisme de ces machines formelles avait entre-temps été adapté en ce sens par le mathématicien S. Ginzburg (1962). Ainsi, Lindenmayer perçoit donc bien quelque chose comme l'amorce d'un courant convergent chez des mathématiciens (Ulam et Eden), chez certains biologistes cybernéticiens ou biophysiciens (Rosen, Stahl et Apter) qui tendent à utiliser le calculateur numérique (discrétisé donc) pour représenter mathématiquement la croissance de formes organiques.

Comme la théorie des automates lui apparaît de son point de vue très liée à la logique mathématique et, particulièrement, à la logique symbolique, qu'il connaît déjà bien par ailleurs, il trouve que ces représentations au moyen des automates recoupent de façon troublante sa propre façon de concevoir une représentation formelle du développement organique. De plus, comme il ne veut pas modéliser un comportement nerveux mais un développement organique, phénomène dans lequel la substance s'étend dans l'espace, le modèle topologiquement rigide de Pitts et McCulloch paraît ne pas convenir, pas plus que celui d'Apter sur la formation des structures. Les

[1] Après 1970, il s'orientera vers la simulation du comportement humain par ordinateur puis vers la théorie psychologique. Mêlant une approche phénoménologique et cybernétique, il proposera à partir de 1982 la théorie psychologique dite du « renversement » (« *reversal theory* ») selon laquelle certains états psychologiques (au sens de l'expérience phénoménologique intérieure et par opposition au béhaviorisme) non explicables rationnellement sont à comparer à un phénomène bistable où le sujet est écartelé entre l'ennui et l'anxiété. Ainsi, il n'y aurait pas d'homéostasie mais plutôt une bistabilité psychologique : à titre thérapeutique, la pratique de l'humour est par exemple prescrite afin de renverser une tendance à l'anxiété… Voir [Apter, M. J., 1977, 1997].
[2] [Apter, M. J., 1966], p. 9.
[3] [Apter, M. J., 1966], pp. 133-152.
[4] [Apter, M. J., 1966], p. 135.

modèles d'automates déjà existants offrent en revanche une possibilité d'extension de la structure formelle[1]. Lindenmayer n'est donc plus là en situation d'indiquer une bibliographie étique qui serait réduite à Woogder, Whitehead, Russell et Carnap. C'est-à-dire qu'à partir de ce moment-là, il ne lui semble plus qu'il défriche un terrain vierge en biologie théorique. Il lui faut au contraire situer son travail par rapport à ce qui existe. D'où la longue revue des travaux déjà disponibles dont il gratifie le lecteur au début du premier article de 1968.

Eviter d'avoir recours à l'ordinateur

L'intérêt principal de cette revue est qu'on y voit Lindenmayer interpréter l'ensemble de tous ces recours antérieurs à l'ordinateur comme n'étant pas homogènes ni d'un seul tenant, spécialement du point de vue de la formalisation qu'on y emploie comme de l'usage qu'on y fait de l'ordinateur. Il y a ainsi ceux qui utilisent l'ordinateur pour s'aider dans les calculs, les déductions et l'intuition de combinaisons complexes entre automates cellulaires (Ulam, Eden, Stahl). Ceux-là se servent de l'automate deux fois en quelque sorte : pour leur formalisme, d'une part, et pour la résolution du problème au moyen du formalisme, d'autre part, puisqu'ils se servent de l'ordinateur comme d'un objet technique de computation.

Mais il y a aussi ceux qui se contentent de prendre les seuls formalismes introduits par les théories des automates pour les faire servir à une authentique théorie de l'organisme vivant (MacCulloch et Pitts, Rosen). Lindenmayer annonce d'emblée qu'il se rattachera à chacune de ces deux perspectives[2]. Mais il ne cache pas que son but principal est de proposer avant tout ce qu'il appelle une « infrastructure théorique »[3] pour le traitement du problème du développement et de la croissance des êtres multicellulaires. En ce sens, Lindenmayer reste persuadé qu'il faut au maximum éviter d'avoir recours à l'ordinateur comme instrument de déduction : ce serait la preuve même de la faible « puissance » de la théorie au sens de Woodger. Le critère de la « puissance » de la théorie est donc bien encore omniprésent dans ces travaux de Lindenmayer et c'est même ce qui conditionne son premier usage de l'ordinateur :

« Une fois que l'on a affaire à plus qu'une poignée de cellules, les combinaisons possibles de ces interactions deviennent pratiquement intraitables par une intelligence dépourvue d'aide, en conséquence ces problèmes exigent soit une théorie mathématique suffisamment puissante, soit l'application d'ordinateurs. »[4]

Or, à lire de près son article, on constate que c'est clairement la première solution de l'alternative que privilégie dans un premier temps Lindenmayer. C'est la raison pour laquelle, un peu à l'image de Rosen, il va d'abord proposer ce qu'il appelle un « modèle mathématique »[5] et non directement une méthode de simulation de la croissance organique alors même que Stahl, l'année d'avant, comme nous l'avons vu, avait en revanche popularisé l'emploi de ce terme pour désigner toute implémentation d'un modèle mathématique sur ordinateur.

---

[1] [Lindenmayer, A., 1973], p. 678.
[2] "Both of these approaches have been utilized in this study", [Lindenmayer, A., 1968a], p. 281.
[3] "a theoretical framework", [Lindenmayer, A., 1968a], p. 281.
[4] "Once we are dealing with more than a handful of cells, the possible combinations of these interactions rapidly become unmanageable by the unaided intelligence, therefore these problems require either a sufficiently powerful mathematical theory, or the application of computers", [Lindenmayer, A., 1968a], p. 281.
[5] Voir le titre : "Mathematical Models for Cellular Interactions in Development", [Lindenmayer, A., 1968a], p. 280. Cette expression qu'à notre connaissance il emploie ici pour la première fois lui vient sans doute de sa lecture de Rosen mais aussi des cybernéticiens comme Ross Ashby.

Un « modèle mathématique » pour l'« intercellularité » dans le développement

Mais Lindenmayer ne doit pas seulement situer sa théorie ou son « modèle mathématique » et le défendre du point de vue de sa méthode de formalisation et de l'usage qu'il y fait des automates. Il doit aussi en soutenir la pertinence et la nouveauté en arguant du fait que le problème biologique auquel il s'affronte n'a pas été traité par ses prédécesseurs.

Voici donc le problème biologique qui se pose selon lui : Lindenmayer veut considérer le comportement dynamique des cellules en même temps dans leur *genèse* par division et dans leurs *interactions* au sein d'un organisme multicellulaire entier. Il lui apparaît en effet essentiel de tâcher de prendre en compte les interactions dues à la contiguïté des cellules chez les êtres multicellulaires. En cela, il se range aux propos du physiologiste des plantes J. G. Torrey (1963)[1] pour qui la compréhension du lien qui existe entre biologie moléculaire et phénomènes de développement à l'échelle de l'organisme passera nécessairement par l'accentuation des recherches sur l'« intercellularité ». Ce dernier met en effet l'accent sur les phénomènes d'« intercommunication »[2] entre cellules : les cellules des organismes multicellulaires s'échangent en permanence des forces, des pressions ou des métabolites. Ce sont ces échanges qui conditionnent en retour de façon décisive leur comportement physiologique et métabolique. Il est donc illusoire de croire que l'on peut agréger simplement et directement (comme Rashevsky avait pu le croire un moment) le comportement d'un être unicellulaire pour se faire une idée du développement des organismes supérieurs. Mais comme il va s'agir de prendre en compte les proximités spatiales, il apparaît nécessaire à Lindenmayer, et cela à la différence de ce qu'exigeait sa théorie précédente des « cycles de vie », de considérer la morphologie ou, tout au moins, la topologie de l'organisme afin de permettre au formalisme d'intégrer des relations de voisinage entre cellules. C'est là qu'il peut distinguer explicitement son propre travail de celui de Robert Rosen[3]. Alors que Rosen n'est toujours parti que de l'organisme entier ou même de la cellule isolée pour demander ensuite à la théorie des automates de l'aider à représenter très grossièrement le métabolisme et la réparation cellulaire supposée (ou démontrée) intervenir dans certaines zones localisées de l'organisme (le noyau, le cytoplasme, etc.), Lindenmayer propose, pour cette représentation formalisée, de partir au contraire du niveau des cellules individualisées, afin de les faire effectivement naître les unes des autres et de les faire interagir. À la différence du formalisme de Rosen, qui se concentre sur la logique du métabolisme et sur la réparation, parce que ce qui l'intéresse au fond est de tenter une représentation mathématique de ce qui est censé être le propre ou l'essence de la vie, le formalisme de Lindenmayer, influencé par la problématique antérieure des « cycles de vie », est donc plutôt conçu pour la prise en compte de la division cellulaire. De même, Lindenmayer n'adopte pas le niveau moléculaire et donc déjà directement algorithmique de Stahl, parce qu'il veut pouvoir prendre un point de vue non pas seulement intra-cellulaire mais inter-cellulaire et communicationnel.

Ce qui intéresse prioritairement Lindenmayer est donc de jeter un pont entre les niveaux moléculaire, cellulaire et organismique. C'est même pour cela qu'il se penche sur les organismes inférieurs ou ce que l'on pourrait appeler les organismes-frontières que sont les algues et les champignons. Moyennant quoi, il admet que son approche devra être en conséquence spatialisée,

[1] J. G. Torrey est un spécialiste américain de la différenciation cellulaire et de la croissance des racines des plantes sous l'effet de substances hormonales. Voir [Lindenmayer, A., 1968a], p. 299.
[2] "intercommunication", [Lindenmayer, A., 1968a], p. 281.
[3] [Lindenmayer, A., 1968a], p. 283.

discrétisée et cellulaire comme celles de Ulam et de Eden (en 1968, il ne semble pas connaître encore le travail de Cohen qui remonte pourtant à 1967[1]). Mais, à la différence de ces derniers et dans la continuité de Rosen, il tentera de se proposer un formalisme qui permette le plus possible la démonstration *a priori* de théorèmes sans recours à l'ordinateur. Ou bien, s'il doit l'utiliser, ce sera surtout comme machine déductive, c'est-à-dire comme soutien à la conceptualisation des conséquences des axiomes et non à leur représentation graphique.

C'est donc cette perspective éminemment théorique, et toujours explicitement inspirée par le positivisme logique de Woodger, qui permet de distinguer son projet de travaux comme ceux de Eden ou Cohen qui, quant à eux, laissaient une place aux simulations probabilistes. En fait, en 1968, le désir initial de Lindenmayer, on l'a compris, est de mettre au point un outil mathématique nouveau, logiciste et constructiviste, pour rendre compte rigoureusement de la logique de croissance des êtres pluricellulaires et qui puisse se passer du recours systématique à la machine comme instrument déductif. Selon lui, il ne faut pas prioritairement attendre de l'ordinateur qu'il présente des propriétés physiques émergentes et non formulables ni prévisibles dans le système formel mais simplement qu'il reste un calculateur logique (un énumérateur déductif) infaillible et performant. C'est pourquoi, Lindenmayer n'aura pas d'abord recours, contrairement à Eden ou Cohen, à la simulation du hasard dans ses modèles algorithmiques. Il ne s'agit pas de recourir à la génération de nombres aléatoires conformes à une distribution statistique donnée dans une loi de probabilité, comme la technique de Monte-Carlo le propose par exemple. En ce sens, Lindenmayer veut bien en venir à une approche générative des organismes pluricellulaires, mais il faut selon lui que l'ordinateur nous soutienne dans le *travail de déduction*, travail qui en droit (si pas en fait), doit rester l'œuvre de l'esprit humain de par le *caractère linguistique et logique* de son matériau : il faut donc selon lui maîtriser ce pouvoir générateur de la machine et ne pas croire lui insuffler d'abord des représentations géométriques de phénomènes physiques et biologiques mais plutôt des représentations logiques. L'ordinateur est ici conçu comme une machine à concevoir mais non comme une machine à imaginer. Ainsi, comme la théorie de Lindenmayer doit par ailleurs beaucoup à l'axiomatisme et au logicisme de Woodger, elle est sans doute, comme chez Rosen, d'abord davantage redevable à la théorie proprement dite des ordinateurs, c'est-à-dire des automates, qu'à leur emploi effectif, au titre de simulateur, comme c'est pourtant déjà le cas dans l'algorithmique moléculaire de Stahl.

Le « modèle développemental » linéaire et les règles de réécriture

Comme il est non seulement un théoricien mais aussi un praticien de la biologie du développement, Lindenmayer ne propose pas de « modèle mathématique » nouveau sans se donner explicitement un terrain biologique qui pourrait convenir aux premiers essais de ce modèle. Le premier article de 1968 distingue donc le type d'objet biologique sur lequel un tel formalisme va être construit et essayé : les organismes filamenteux, c'est-à-dire ceux qui ont une structure multicellulaire filaire ou arborescente. L'intérêt de ces organismes est qu'ils facilitent l'introduction du formalisme des interactions cellulaires dans la mesure où ils permettent d'en réduire d'abord le nombre et la dimension. Ces objets réels simplifiés sont déjà en quelque sorte des objets théoriques. Un corps filamenteux possède des cellules dont le voisinage se réduit le plus souvent aux deux cellules latérales. L'introduction du formalisme pourra donc se faire très classiquement :

[1] Il ne citera l'article de Dan Cohen qu'en 1971. Voir [Lindenmayer, A., 1971], p. 689.

d'abord simplement, en partant de ces organismes, puis par complexifications successives du voisinage cellulaire.

Pour produire un modèle mathématique formel de la croissance de tels organismes, Lindenmayer utilise donc la théorie mathématique des machines séquentielles ou théorie des « boîtes noires ». Cette théorie est inspirée, on l'a dit, de la machine de Turing, de la théorie des automates de von Neumann, mais aussi de la cybernétique. Trois ans plus tard, lorsqu'il évoquera cette période à l'occasion du 4ème *Congrès International de Logique, de Méthodologie et de Philosophie des Sciences* (organisé à Bucarest en 1971[1]), Lindenmayer avouera que c'est en fait essentiellement le livre d'introduction à la cybernétique de Ashby, paru en 1956[2], qui l'a aidé à concevoir ses premiers automates interactifs :

« *J'aimerais ajouter ici que W. Ross Ashby (1956) a été parmi les premiers à énoncer* clairement *la méthode de construction valant pour les automates interactifs et je lui dois une dette pour l'apprentissage du principe de base de cette méthode.* »[3]

C'est dans ce genre d'aveu que l'on comprend l'importance pour un biologiste de formation de disposer de bons ouvrages de vulgarisation ou d'introduction et qui soient faciles d'application dès lors qu'une nouvelle méthode formelle se fait jour. En 1968, Lindenmayer se sert donc des explications simplifiées de Ashby et définit pour sa part des cellules formelles qui possèdent une ou plusieurs entrées, des sorties et un état. La « machine séquentielle » *représentant* une seule cellule est donc pour lui un quintuplet rassemblant[4] :

- la fonction donnant l'état suivant de la cellule
- la fonction donnant la sortie suivante de la cellule
- les variables d'état
- les variables d'entrée
- les variables de sortie

Dans le système de Lindenmayer, les entrées des cellules correspondent aux sorties des cellules voisines : c'est bien en effet son but de rendre compte des relations intercellulaires dans la topologie des plantes. Mais ce qui est nouveau et décisif par rapport à la formalisation antérieure de Ulam ou de Apter, par exemple, c'est que Lindenmayer permet que l'état suivant d'une cellule soit un *dédoublement* c'est-à-dire une *division*, en terme biologique, de cette même cellule. Par là il veut formaliser une croissance pouvant se déclencher à n'importe quel endroit de l'organisme déjà formé. Ce n'est donc pas l'environnement qui fait naître spontanément les cellules, comme dans le modèle algorithmique d'Ulam, mais ce sont les cellules déjà vivantes qui « choisissent » ou non de se multiplier. Et ainsi l'organisme peut s'accroître. Pour exprimer ce modèle, Lindenmayer a abandonné la logique symbolique très sévère et purement syntaxique de Whitehead et Russell. Ainsi, pour représenter les fonctions de transitions a-t-il d'abord recours à des matrices

[1] Patrick Suppes en était l'organisateur et l'éditeur principal, avec L. Henkin, A. Joja et G. R. C. Moisiel.
[2] *An introduction to cybernetics*, Chapman and Hall, London, 1956.
[3] C'est dans une note de bas de page parue dans un article de présentation générale sur les "Automates cellulaires, les langages formels et les systèmes développementaux" que Lindenmayer avoue cette forte dette à l'égard de l'ouvrage de W. Ross Ashby : "I would like to add here that W. Ross Ashby (1956) was among the first to enunciate *clearly* the method of construction for interacting automata and I owe this book a debt for learning the basic principle of this method.", [Lindenmayer, A., 1973], p. 678. C'est nous qui soulignons.
[4] Voir [Lindenmayer, A., 1968a], p. 280.

récapitulatives[1]. Il est à noter que ce sont des représentations bidimensionnelles : elles se présentent sous la forme de tableaux à deux séries d'entrées. Lindenmayer rompt ainsi avec les représentations purement linéaires car préférentiellement linguistiques et anti-intuitivistes des *Principia Mathematica* et adopte une représentation mathématique de nature plus graphique[2]. Il confirme même cette évolution en adoptant conjointement une représentation de ces mêmes fonctions par ce qu'il appelle, à la suite des ingénieurs en automatique, des « diagrammes de transitions »[3]. Les états de la cellule y sont représentés par les sommets d'un graphe et les diverses arêtes orientées de ce graphe représentent les transitions possibles entre les états en fonction des entrées de la cellule. Enfin, il n'est pas possible d'utiliser le formalisme simple des automates à états et des fonctions de transition si l'on ne se donne pas également un procédé qui détermine la structure du temps, c'est-à-dire les instants où il faut appliquer de façon synchrone ces fonctions. C'est pourquoi un tel formalisme, comme le précise Lindenmayer, en plus de la discrétisation réaliste des parties de l'organisme, les cellules[4], nécessite la *discrétisation du temps* : comme dans la simulation de Cohen ou dans l'automate de Ulam, à chaque pas de temps, chaque cellule va appliquer ses deux fonctions de transitions.

Il faut alors que Lindenmayer arrive à modifier le formalisme habituel des fonctions de transition pour pouvoir représenter la croissance du filament par division d'une cellule mère en deux cellules filles. Il modifie de cette façon la matrice de transition des états des cellules[5] :

entrée de la cellule

état de la cellule	0	1
0	0	1
1	11	0

Le contenu des cases du tableau indique la valeur (0 ou 1) de l'état suivant de la cellule en fonction de son entrée actuelle et de son état actuel. Dans la case que nous avons indiquée par une flèche, on voit apparaître deux états. Ce qui indique en fait que l'on a affaire à deux cellules

[1] [Lindenmayer, A., 1968a], p. 282.

[2] Voir [Dagognet, F., 1973]. L'auteur croit percevoir que, dans toutes les sciences et même dans les arts, les « graphèmes » tout en reproduisant partiellement, abstraient l'essentiel et créent un savoir inédit en produisant et en extériorisant l'inaperçu de ce qu'ils représentent. En ce sens, l'iconographie, plus que le langage alphabétique, arbitraire et linéaire, participerait d'une transfiguration du donné par le symbole construit. En tout cas, il est clair que le passage de Lindenmayer de la logique symbolique au formalisme de la théorie des machines de Turing et des automates n'est pas dû aux mêmes réflexions que celles qui avaient initialement incité Turing à cette même modification en mathématiques (en 1936, à l'occasion du traitement du problème de la décidabilité). La respatialisation que Lindenmayer propose ici n'a pas la fonction d'une transfiguration. Ce qu'il impose à son formalisme provient du fait qu'il s'agit de prendre en compte commodément un certain nombre de relations multilatérales et spatialisées comme les relations intercellulaires de voisinage. Déjà, dans l'article de 1964, Lindenmayer n'avait pu s'empêcher de présenter sous une forme graphique arborescente une interprétation des hiérarchies de relations au sens de Woodger. Mais la position spatiale réciproque des cellules n'était pas prise en compte puisque si, par exemple, R était une relation de mitose, avec x R (y,z) pour la cellule mère x et les deux cellules filles y et z, dans ce formalisme les deux cellules filles ont une *position interchangeable* : y est équivalente à z. Ce qui n'est pas le cas avec un automate : ce dernier est donc plus réaliste que la symbolique linguistique puisqu'il ne fait pas *a priori* abstraction de l'ordre spatial intuitif (gauche, droite). Il faut complexifier la symbolique pour y faire paraître un tel ordre.

[3] [Lindenmayer, A., 1968a], p. 282.

[4] Cette discrétisation était déjà présente chez Woodger. Mais, c'est dans la théorie des cycles de vie de Lindenmayer qu'elle est appuyée sur l'identification directe, réaliste en ce sens, entre un symbole et un individu biologique ou une partie très individualisée du point de vue du savoir biologique (la cellule). Le formalisme est donc faiblement abstractif dans ces conditions.

[5] Voir [Lindenmayer, A., 1968a], p. 285.

dont Lindenmayer spécifie les états, à leur naissance. Ici, chacune des cellules filles commencera donc avec un état à 1.

Ainsi, à la différence de la proposition de Eden, la croissance peut intervenir de l'intérieur de l'organisme en quelque sorte, comme un bourgeonnement, et non pas seulement sur ses bords comme une accrétion ou une agrégation, c'est-à-dire aux frontières de son corps avec l'environnement. Il y a là quelque chose qui correspond en effet davantage à la réalité biologique de la croissance d'un corps filamenteux. Avec ce formalisme, on perçoit une croissance ou un développement plus qu'une reproduction ou qu'une réplication. Cela est d'autant plus vrai que Lindenmayer n'en donne pas d'abord une représentation géométrique sur un plan quadrillé, comme le firent en revanche Eden, Ulam et Cohen. Il reste plutôt sensible aux relations à la fois hiérarchiques et historiques (ou généalogiques) de l'arbre symbolique qui se construit à partir de l'itération des règles de transition sur une séquence de 0 et de 1. Son premier modèle est en effet un tableau de 0 et de 1 à une seule colonne et où les cellules filles s'insèrent à la place de la cellule mère. Ce qui a pour effet de donner un modèle linéaire sous la forme d'une séquence binaire.

Observation de l'« émergence » d'une « régularité inattendue »

Toutefois, même si Lindenmayer ne considère pas l'ordinateur comme servant en premier lieu à simuler des formes, c'est-à-dire à reproduire des formes réalistes sur une table traçante, il lui laisse le soin d'appliquer les règles de transition et de division cellulaire à la séquence binaire. Et c'est en lui faisant écrire, l'une sous l'autre, les séquences binaires générées successivement que lui apparaît visuellement ce qu'il appelle une « régularité inattendue ». En effet, si on considère, comme le fait Lindenmayer pour simplifier son modèle, que le flux des entrées ne va que dans un sens (de gauche à droite), que la valeur de l'état de la cellule de gauche est égale à la valeur de l'entrée de la cellule de droite et, enfin, que la cellule la plus à gauche reçoit une entrée environnementale toujours égale à 0 (voir la 2ème colonne de la figure 1), le développement (dont chaque pas de temps est numéroté dans la première colonne) à partir d'une cellule dont l'état initial est 1 sera le suivant :

0	0	1
1	0	11
2	0	110
3	0	1101
4	0	110111
5	0	11011100
6	0	1101110010
7	0	1101110010111
8	0	11011100101111100

Figure 1

Lindenmayer commente ainsi son observation :

« Aucune régularité ne peut être observée dans la distribution des divisions, mais il émerge une régularité, dans la figure 1, qui s'exprime par les colonnes solides d'états identiques générés

de gauche à droite. Cela se produit en dépit du fait que de nouvelles cellules sont continuellement insérées et que les vieilles cellules sont poussées vers la droite ou disparaissent par division. Ainsi, une forme stable est générée, se déplaçant de la gauche vers la droite, tandis que les cellules participant à cette forme sont continuellement remplacées ou déplacées. »[1]

Lindenmayer emploie bien dans ce contexte-là le verbe « émerger » afin de désigner le phénomène d'apparition de structures ou de formes (« *patterns* ») dans son modèle. Il oppose l'arborescence des divisions hiérarchiques au sens de Woodger, telle qu'il a pu la dessiner précédemment, à cette présentation par séquences linéaires empilées qui privilégie cette fois-ci non pas la génération et la filiation, mais le voisinage et la forme résultante des générations cellulaires.

La représentation par cellules spatialisées et ordonnées (gauche-droite) se révèle donc bien plus à même de faire surgir des régularités dans la forme. De surcroît, Lindenmayer suggère que l'on a déjà là une possibilité de confirmer empiriquement la valeur au moins qualitative du modèle mathématique. Car si l'on essaie d'interpréter biologiquement les colonnes où les 1 sont majoritairement présents, on peut voir la manifestation de quelque chose d'équivalent aux régions de croissance apicale telles qu'elles existent chez les plantes au niveau des pousses et des racines[2] : des formes s'« auto-répliquent » (« *self-replicate* »[3]) et des cellules nouvelles apparaissent constamment du côté de l'apex (à gauche ici). Ces cellules sont repoussées en arrière (« *swept back* »[4]) ou se divisent elles mêmes de façon à donner toujours la même apparence à la zone apicale. La structure différenciée de la zone apicale conserve donc sa forme ainsi qu'on l'observe dans la nature.

Mais Lindenmayer ne se contente pas de cette observation. Il se propose d'aller jusqu'à démontrer formellement la nécessité d'une telle émergence. Pour ce faire, il précise ses définitions et prouve d'abord un ensemble de théorèmes généraux portant essentiellement sur la structure du système formel développemental ainsi conçu. Il montre par exemple que l'ensemble des séquences binaires finies doté d'un simple opérateur de concaténation constitue un monoïde libre par rapport à cet opérateur[5]. Huit autres théorèmes sont alors démontrés qui concernent principalement les rapports entre les longueurs des séquences d'états et les longueurs des séquences d'entrées. Par la suite, en employant des démonstrations par récurrence et en utilisant la règle d'associativité pour la concaténation, Lindenmayer arrive effectivement à prouver de façon formelle, mais pour le seul cas précédent, la nécessité de l'émergence de la « forme apicale constante » qu'il avait auparavant observée[6].

Ainsi donc, l'observation sur ordinateur de la physionomie de certains résultats lui a d'abord suggéré un théorème qu'il a été ensuite à même de démontrer formellement. Dans ce cas de figure, l'ordinateur[7] a bien rempli un rôle heuristique : il a suggéré un résultat théorique à partir

---

[1] "No regularity can be observed in the distribution of divisions, but there emerged an unexpected regularity in fig. 1, which is expressed in the solid columns of identical states that are generated from left to right. This is in spite of the fact that new cells are continually inserted, and old ones are being pushed to the right or disappear by division. Thus a stable pattern is generated, moving from the left tot the right, while the cells participating in this pattern are continually replaced or displaced", [Lindenmayer, A., 1968a], p. 287.
[2] [Lindenmayer, A., 1968a], p. 287.
[3] [Lindenmayer, A., 1968a], p. 294.
[4] [Lindenmayer, A., 1968a], p. 294.
[5] Puisque la concaténation est associative, que l'ensemble des séquences finies est fermé par rapport à cette concaténation et qu'il existe un élément neutre : la séquence vide. Voir [Lindenmayer, A., 1968a], p. 290.
[6] Voir le théorème 10, [Lindenmayer, A., 1968a], p. 293.
[7] En l'occurrence un IBM 1620 et un IBM 7040 programmés en FORTRAN II. Voir [Lindenmayer, A., 1968a], p. 293.

d'une ressemblance évaluée d'abord seulement qualitativement, intuitivement, au moyen d'une perception et, en particulier, par le sens de la vue.

Pour finir sur ce modèle simplifié à une dimension, Lindenmayer montre, de la même manière, que l'on peut voir apparaître une « zone apicale qui ne se divise pas » (« *non-dividing apical zone* »[1]) si l'on prend les mêmes règles de transition que précédemment et si l'on impose une valeur de 1 pour l'entrée environnementale. Si, en revanche, on impose une règle de division inégale (c'est-à-dire donnant naissance à une cellule fille à l'état 0 et l'autre à l'état 1), on peut voir et démontrer la nécessaire apparition de motifs à bandes répétitives sur la séquence binaire. Dans ces deux derniers cas, comme dans le précédent, la définition de la machine séquentielle donne des résultats qui sont interprétables biologiquement, tout au moins du point de vue de Lindenmayer. Ce qui tend, selon lui, à augmenter la valeur du modèle, mais dans un sens que l'auteur n'explicite pas. Il nous est cependant possible de comprendre un peu mieux quel statut Lindenmayer donne au genre de modèle mathématique qu'il introduit si l'on évoque le passage où est posée la question de savoir si, conformément à l'avis de certains botanistes comme F. A. L. Clowles, il peut exister, chez certains méristèmes apicaux, une zone apicale quiescente, c'est-à-dire une zone où aucune division n'intervient. Lindenmayer ne se prononce pas sur la question, mais il insiste sur le fait qu'un modèle de ce type « pourrait aider à tirer les conséquences d'une telle hypothèse et pourrait rendre possible la spécification d'expérimentations qui la supporteraient ou la rejetteraient »[2]. Autrement dit, *le modèle ne mène pas en tant que tel et directement à des expérimentations*, il est plutôt un *soutien à la déduction des conséquences logiques d'une telle hypothèse*. Ce soutien pourrait *ensuite* se révéler fructueux en nous indiquant comment, à quel endroit et dans quelles conditions précises, des observations réelles (qu'on imagine anatomiques, cytologiques ou histologiques et chirurgicales) pourraient être effectuées. Le modèle sert donc ici à rendre indirectement testable une hypothèse jusqu'à présent postulée mais ne reposant sur aucune observation ou expérimentation. Ce n'est pas lui qui teste la théorie. Le modèle sert à désigner les lieux d'une interrogation expérimentale nouvelle mais il ne remplace nullement l'expérimentation dans la mesure où il n'a pas le même statut cognitif. Le statut du modèle est lui-même directement conditionné par sa nature qui, encore une fois, est ici préférentiellement perçue comme linguistique, symbolique et conceptuelle. Ces considérations finissent par mener Lindenmayer à la proposition d'une « théorie du contrôle morphogénétique ».

La « théorie du contrôle morphogénétique »

Dans son second article de 1968, alors que le système formel antérieur à entrées unilatérales est, selon lui, déjà capable de rendre compte des transferts de substances de croissance comme l'auxine telle qu'elle intervient dans les pousses des plantes vasculaires[3], un contrôle morphogénétique intégral, même très simplifié, ne lui paraît en revanche pas raisonnablement modélisable sans la prise en compte de la bidirectionalité des influences de voisinage dans le formalisme à machines séquentielles. C'est donc dans le but très clair d'ébaucher une *théorie formelle du contrôle morphogénétique* et sous l'impulsion de spéculations

[1] [Lindenmayer, A., 1968a], pp. 294-295.
[2] "The point I would like to emphasize here is that a model like the present one could help in working out the consequences of such a hypothesis and make it possible to specify experiments which would support or reject it", [Lindenmayer, A., 1968a], p. 295.
[3] [Lindenmayer, A., 1968b], p. 300. Rappelons que l'auxine (ou acide beta-indolylacétique), dérivée d'un acide aminé, est une phytohormone de croissance. Elle agit entre autres sur l'extensibilité de la paroi cellulaire. Voir [Vogel, G. et Angermann, H., 1984, 1994], p. 337.

comparables à celles de Michael Apter, que Lindenmayer complexifie dans un deuxième temps son modèle initial en permettant que chaque cellule reçoive deux entrées, c'est-à-dire une entrée sur chacun de ses deux côtés au regard de la direction du filament. Or, parmi les modèles ayant déjà tâché de prendre en compte ce contrôle morphogénétique par des flux de substances, Lindenmayer considère le modèle mathématique continuiste des « morphogènes » de Turing de 1952[1] comme très intéressant dans la mesure où il fournit des « hypothèses explicatives »[2]. Lindenmayer veut donc manifestement suivre cette même manière de modéliser mathématiquement *pour théoriser et expliquer*. Cependant, comme Eden en 1960, et c'est là le point décisif selon nous, il reconnaît qu'il y a trop de « complexité mathématique »[3] à calculer des équations différentielles simultanées de premier et de second ordre. C'est pourquoi il justifie ainsi sa propre démarche créative, non sans avoir reconnu une certaine dette à l'égard de Turing :

« L'avantage de la théorie proposée dans cet article [le sien propre] réside dans le fait qu'on n'y utilise que des mathématiques finitistes et que, par conséquent, elle se prête d'elle-même plus aisément aux manipulations combinatoires telles que celles d'une programmation sur ordinateur digital ; et l'architecture théorique peut y être maintenue à un niveau rudimentaire. De plus, on pourrait obtenir des résultats susceptibles d'être tout autant pourvus de sens pour des considérations morphogénétiques que ceux qui sont fondés sur des équations différentielles. »[4]

Parmi les premiers biologistes, Lindenmayer reconnaît donc clairement et explicitement que la discrétisation de l'espace et du temps, ainsi que la modélisation utilisant un système formel moins sophistiqué que celui dont dispose l'ensemble des nombres réels (la représentation du *continuum* physique), peuvent s'avérer indispensables pour rendre compte de la morphogenèse, étant entendu que quelle que soit la méthode envisagée, il faut recourir à d'énormes puissances de calcul. Pour Lindenmayer donc, comme pour Eden et Ulam, le travail de Turing est un révélateur en un double sens. D'une part, il signale qu'il n'est pas absolument impossible de formuler mathématiquement les règles de mise en forme du vivant. Mais d'autre part, il enseigne clairement les limites de l'outillage des mathématiques traditionnelles, celui des mathématiques du continu se prêtant à une analyse infinitésimale donc différentielle. C'est pourquoi, par des chemins divers, et à l'encontre de l'approche continuiste encore prônée à la même époque par Goddard et Erickson, les modélisateurs que sont Eden, Ulam et lui-même, selon Lindenmayer, arrivent à la conclusion qu'il faut désormais discrétiser la représentation des phénomènes morphogénétiques dans les modèles *avant* de pouvoir déléguer les calculs afférents à la machine numérique.

Ce que l'on gagne à discrétiser

Or, comme on le voit, ce n'est pas sans mal que cette idée s'impose chez quelques biologistes spécialistes de la morphogenèse végétale, puisqu'il faut donc attendre l'article de 1967 de Cohen et celui de 1968 de Lindenmayer pour que des botanistes de formation convergent vers cette solution et reprennent les propositions formulées avec un peu d'audace par le statisticien

[1] Voir *supra*.
[2] En anglais : « explanatory hypotheses », *in* [Lindenmayer, A., 1968b], p. 300.
[3] Expression de Lindenmayer, op. cit., p. 300.
[4] "The advantage of the theory proposed in the present paper is that only finite mathematics is used, and consequently it lends itself more readily to combinatorial manipulations, such as programming for digital computers, and the theoretical framework can be kept at a rudimentary level. At the same time results are obtainable which could be just as meaningful for morphogenetic considerations as those based on differential equations", [Lindenmayer, A., 1968b], pp. 300-301.

Murray Eden dès 1960. Ce délai pour le transfert de tels modèles mathématiques et physico-mathématiques vers la biologie théorique peut s'expliquer si l'on comprend que, comme nous l'avons précisé, les théoriciens comme Lindenmayer ne veulent pas renoncer à « expliquer » ce qui se passe au niveau cellulaire (au sens de la cellule vivante) tout en souhaitant élaborer un langage commode et des règles formelles pour la croissance des plantes. Lindenmayer repousse ainsi le plus tard possible la solution de la seule simulation photo-réaliste. Il ne lui suffit pas de simuler ; il lui faut rendre raison des phénomènes par des modèles mathématiques de la morphogenèse. Toutefois, le transfert conceptuel est assumé très précisément au moment où Lindenmayer, en tant que botaniste, reconnaît qu'il lui faut faire les *mêmes critiques* qu'Eden à l'encontre de la proposition de Turing. Or, Lindenmayer s'autorise à reprendre telles quelles ces critiques antérieures d'un statisticien et informaticien (donc il préside au transfert d'un formalisme de l'analyse combinatoire et de la théorie des automates vers la biologie) parce qu'il décide de considérer que le biologiste théoricien ne perdra finalement *rien de substantiel* à ce transfert des représentations discrétisées : selon Lindenmayer, en passant aux formalismes discrétisés, il n'y a pas à craindre une quelconque perte de sens biologique par rapport aux représentations de la morphogenèse par équations différentielles. Nous verrons un peu plus tard que c'est justement cette décision cruciale de Lindenmayer, préparée il est vrai par sa pratique antérieure de la méthode logiciste en biologie théorique, qui sera très vite controversée par un certain front théorique de l'embryologie chimique. Quoi qu'il en soit, de lui-même, et au vu de l'extrait précédent, Lindenmayer reconnaît que le prix à payer pour la calculabilité effective est la perte en sophistication de l'architecture théorique : elle devient plus « rudimentaire », avoue-t-il. Mais, ce qui le décide néanmoins définitivement à adopter le formalisme discrétisé est bien le fait que les résultats formels obtenus se révèlent, selon lui, tout autant porteurs de sens à l'échelle des objets de la biologie du développement qu'ils le sont déjà à l'échelle des objets de la biologie moléculaire dans les modèles algorithmiques de Stahl : ainsi, comme nous l'avons vu, il lui est par exemple possible de faire directement exprimer à ses formalismes des théorèmes tendant à expliquer *a priori*, à partir de règles minimales pour les automates, la « forme apicale constante ». Ces formalismes n'auraient donc, y compris pour la biologie du développement, rien à envier au formalisme intégro-différentiel : ils sont tout autant à même d'expliquer sensément les phénomènes biologiques. Ce que Lindenmayer prouve d'abord à ses yeux, mais sans aucun recours à des données empiriques nouvelles ni à des expérimentations spécifiquement menées à des fins de test, ce n'est donc pas directement la validité du modèle pour une série d'observations précises, mais, un peu comme le travail de simulation théorique de Cohen, la simple potentialité du formalisme à être mis sensément en face d'un discours biologique, c'est-à-dire en face de propositions verbales de nature biologique ; c'est la capacité du formalisme discrétisé à faire, lui aussi, immédiatement sens pour le biologiste. Si l'on veut parler en termes de test et de validation de modèle, c'est donc au mieux la testabilité du modèle mathématique par automates discrets qui a été validée aux yeux de Lindenmayer. Il nous montre, au fond, que, contrairement à une idée répandue à l'époque, en optant pour un formalisme discret, on n'en passe pas irrémédiablement à l'insignifiance du formalisme du point de vue biologique. Et cette possible présence d'un sens biologique, jusques et y compris dans la formalisation discrète, est encore une fois mise en évidence dans la complexification du formalisme que Lindenmayer met en place pour représenter des formes ramifiées. Mais la prise en compte de ce phénomène nécessite une sophistication du formalisme.

Le « modèle développemental » de la ramification

En effet, afin de représenter la ramification en plusieurs branches, il faut pouvoir indiquer sur le filament formel, qui n'est, rappelons-le, qu'une ligne de 0 et de 1, le lieu précis où vient se brancher un rameau ainsi que le lieu où intervient la fin de la description des cellules du rameau. À cette fin, Lindenmayer choisit de recourir à ce qu'il appelle un « nouveau concept formel »[1] : des parenthèses. Ainsi, pour l'état d'une cellule, on peut ajouter à la fonction de transition de cet état l'état de cette même cellule *plus* l'état d'une nouvelle cellule, comme précédemment quand il n'y avait que la division cellulaire qui était possible, mais en inscrivant cette fois-ci *l'état interne de cette nouvelle cellule entre parenthèses* ; ce qui signifie qu'elle commence un rameau latéral sur le filament. Cette cellule entre parenthèse pourra ensuite elle-même se diviser ou ramifier. Mais tout ce qu'elle produira restera donc entre parenthèses, cela pour signifier qu'elle est et reste un rameau. Les parenthèses peuvent ensuite être situées elles-mêmes entre des parenthèses car il peut, bien sûr, y avoir plusieurs ordres de ramification. Le formalisme des parenthèses, notons-le, a donc pour effet de conserver encore sa linéarité au formalisme, cela alors même que le filament est ramifié. L'inconvénient du formalisme des parenthèses cependant, et Lindenmayer le concède, est que la position relative des branches, c'est-à-dire leur arrangement mutuel ou phyllotaxie, n'est pas prise en compte[2].

Première calibration du modèle sur des algues et premier dessin

Ce faisant, afin de « démontrer l'usage des concepts mathématiques introduits »[3], Lindenmayer procède à sa première confrontation du modèle (sous sa forme ramifiée donc) avec une espèce vivante particulière : une algue rouge du nom de *Callithamnion roseum*[4]. Il précise que *seuls certains aspects* de la description détaillée (disponible dans un ouvrage de botanique et d'histologie qu'il cite par ailleurs[5]) de ces algues seront pris en compte. À lire les procédures suivies dès lors par Lindenmayer, il se révèle le fait important que le travail de calibration du modèle doit être d'une nature bien différente de ce qu'il est dans le cas d'un modèle différentiel. Il suffit en effet à Lindenmayer de partir de quelques unes des règles localement suivies par les parties principales de la « structure développementale »[6]. Or, ces règles sont précisément celles qui sont explicitées en des termes, il est vrai, techniques, par les ouvrages de botanique et d'histologie, mais aisément traduisibles en des termes simplement graphiques et simulables par le modèle à machines séquentielles[7]. Ainsi, dans l'article suivant de 1971, Lindenmayer pourra dire à ce sujet que « de telles descriptions développementales [produites au moyen de mathématiques

[1] "Branching filaments can be handled within the already available theoretical framework with the addition of only one more formal concept", [Lindenmayer, A., 1968b], p. 307.
[2] [Lindenmayer, A., 1968b], p. 307.
[3] Selon l'expression qu'il emploiera dans l'article de 1971 pour introduire au même cas concret : "In order to demonstrate the use of mathematical concepts, we defined, and to exhibit their properties and relationships, we proceed to a discussion of several concrete developmental systems and languages", [Lindenmayer, A., 1971, p. 462.
[4] [Lindenmayer, A., 1968b], p. 308.
[5] [Lindenmayer, A., 1968b], p. 308.
[6] "developmental pattern", [Lindenmayer, A., 1968b], p. 309.
[7] Lindenmayer avoue pour la première fois se livrer lui-même véritablement à une « simulation » lorsqu'il cherche, comme ici, à calibrer son infrastructure générale de modélisation sur cette algue réellement existante afin de constituer un modèle discret à règles précises qui lui soit adapté. Voir [Lindenmayer, A., 1968b], p. 308.

finitistes] semblent être plus proches de notre compréhension intuitive d'un organisme »[1]. Il s'agirait donc d'un formalisme plus proche de l'intuition directe des phénomènes naturels observés et de leur verbalisation. Pour l'algue rouge considérée, les règles botaniques et histologiques sont par exemple au nombre de quatre :

1) le filament principal doit garder à sa base de une à trois cellules qui ne portent aucune ramification,
2) après quoi, chaque cellule qui suit dans le filament doit, au contraire, donner naissance à une branche ; cette branche doit être unique,
3) à chaque étape, quatre ou au moins trois cellules en dessous du sommet du filament principal doivent ne pas être porteuses de branche,
4) enfin, chaque ordre de ramification supérieur ou égale à 1 doit répéter les mêmes règles pour lui-même que les trois règles précédentes qui valaient pour l'ordre zéro, c'est-à-dire pour le filament principal.[2]

Lindenmayer n'a alors pas de difficulté à exprimer ces règles directement dans les règles de transition de ses cellules-automates : la traduction formelle est quasi-immédiate puisque la description morphologique se présente déjà comme un récit génétique et logique de la mise en place de la forme.

Il s'avère cependant que deux modèles formels au moins sont constructibles à partir de ces 4 règles morphogénétiques et botaniques. D'une part en effet, si l'on impose en plus au modèle de ne pas du tout recourir à la possibilité pour les cellules de recevoir des entrées de l'un ou l'autre de leurs côtés, on peut néanmoins trouver des règles de transition, de division et de ramification qui vont être conformes aux exigences de la description botanique. Il suffit pour ce faire de définir 9 états internes possibles pour les cellules. Lindenmayer fait alors effectuer les computations logiques en FORTRAN II sur un IBM 1620. Or, pour la programmation et la manipulation de l'ordinateur, Lindenmayer ne procède pas par lui-même : il est aidé par un linguiste du nom de Peter Fries[3]. Pour la première fois, Lindenmayer représente alors le résultat de la computation des quelques premiers pas de ce premier modèle d'algue rouge sous une forme spatialisée, non-linéaire en ce sens[4]. C'est-à-dire qu'il abandonne le formalisme des parenthèses et qu'il présente le résultat sous forme d'un *dessin* arborescent où chaque cellule est cette fois-ci réalistiquement représentée par une case dans laquelle figure le numéro de l'état de la cellule correspondante. Les ramifications sont placées alternativement (et d'autorité) à droite puis à gauche du filament porteur car le formalisme du modèle, rappelons-le, nous laisse indécis sur ce point. Le passage au dessin figural en ce sens commanderait un perfectionnement du formalisme des parenthèses. Ce que Lindenmayer juge peu utile pour l'heure. Il s'impose donc cette règle supplémentaire de l'alternance simplement pour que le formalisme linéaire soit représentable graphiquement de façon relativement réaliste. Un peu plus tard pourtant, en 1971, sa conception sur ce point évoluera : il

[1] "Such developmental descriptions appear to be closer to our intuitive understanding of an organism, gained by looking at its structure from time to time on one hand, and by obtaining recordings of various aspects of its function on the other", [Lindenmayer, A., 1971), p. 455.
[2] Nous synthétisons ici le propos de [Lindenmayer, A., 1968b], p. 309.
[3] [Lindenmayer, A., 1968a], p. 299 et [Lindemayer, A., 1968b], p. 315. Lindenmayer remercie également le psychologue Jerome C. Wakefield pour les commentaires oraux que ce dernier a produit sur son premier article de 1968.
[4] Il ne semble pas qu'il se soit en revanche servi de l'ordinateur (de sa table traçante par exemple) pour construire un tel dessin.

considérera que cette possibilité de passer à une forme dessinée est un acquis de grande valeur pour la biologie :

« Les conclusions biologiquement importantes de ce travail paraissent résider dans le fait que, premièrement, avec des systèmes formels construits de façon appropriée, des expressions peuvent être générées qui, lorsqu'elles sont traduites en dessins sur la base de conventions explicites, se trouvent représenter plus ou moins précisément le développement au niveau cellulaire d'une variété d'organismes simples. »[1]

Cette possibilité de traduction du formalisme en un dessin, elle-même liée au fait que le formalisme se trouve être relativement de plain-pied avec l'intuition du biologiste, est donc finalement comprise comme quelque chose d'essentiel pour Lindenmayer.

Par la suite, dans l'article de 1968 (partie II) et toujours avec le même cas concret de l'algue rouge, Lindenmayer montre qu'il est possible de faire simuler les 4 règles morphogénétiques observées sur cette algue par un second modèle qui, pour sa part, recourt à des entrées bilatérales mais qui, en revanche et assez logiquement, ne nécessite que 4 états internes distincts pour les cellules. Le choix entre les différents moyens de sophistiquer le modèle formel est donc, on le voit, une question de compromis logique. Par la suite, le résultat de ce second modèle fait également l'objet d'une figuration arborescente. Les deux « images »[2] sont approximativement les mêmes, selon Lindenmayer. Ce qu'il veut dire, c'est que, du point de vue de la performance que pourrait y voir un botaniste, ces deux images sont interchangeables.

Lindenmayer insiste donc bien sur la conclusion que l'on doit aussi tirer de ce constat de similarité : dans un modèle discret de morphogenèse, s'il y a similarité structurelle, cela ne signifie nullement qu'il y a similarité des fonctions de transitions, c'est-à-dire des processus physiologiques particuliers (schématisés dans les fonctions de transitions) censées intervenir dans la morphogenèse. Autrement dit, les règles morphogénétiques observées et prises en compte *sous-déterminent* les paramètres des modèles à automates. Et, couplées à ces modèles, de telles règles ne peuvent donc pas directement servir à discriminer certaines hypothèses de l'embryologie chimique concernant les mécanismes de l'induction ou de la différenciation, par exemple. En particulier, dans le cas de l'algue rouge, un modèle avec flux d'information chimique (ou autre) donne le même résultat qu'un modèle qui en est dépourvu.

En brossant ensuite cursivement un tableau élémentaire des quelques connaissances embryologiques de 1968 sur la différenciation cellulaire et sur l'induction, Lindenmayer ajoute l'idée que, de ce point de vue-là, l'embryologie expérimentale ne peut pas encore aider le modélisateur à sortir de l'indécision. Il termine cependant son article en exprimant une nette préférence *a priori* pour le modèle à entrées bilatérales et à faible nombre d'états internes car, dit-il, ce second modèle semble bien « plus économique » au niveau de l'information génétique mobilisée. Ainsi donc, comme Cohen en 1967, l'argument de Lindenmayer fait fond sur l'idée que ces règles formelles et locales de transition soient assimilables aux rôles que jouent les gènes

[1] "The biologically important conclusions of this work appear to be, first, that with appropriately constructed formal systems expressions can be generated which when translated into drawings on the basis of explicit conventions are found to represent more or less accurately the development at the cellular level of a variety of simple organisms", [Lindenmayer, A., 1971], p. 475.

[2] "Comparing the growth patterns of these two models, we find a structural similarity between figs 5 and 7. What we mean by this is that the origins and lengths of the branches are approximately the same in the two pictures", [Lindenmayer, A., 1968b], p. 312.

individuels dans chaque cellule au cours du développement organique[1]. De plus, selon lui, l'évolution des organismes pluricellulaires et des cellules elles-mêmes aurait donc vraisemblablement procédé de manière à ce qu'il y ait un nombre minimal d'états pour une structure développementale donnée[2].

Finalement, ce qui apparaît à Lindenmayer en 1968, c'est que le problème principal du biologiste du développement, lorsqu'il est décidé à recourir à des formalismes à machines séquentielles pourvues de règles à conditions localisées, est de travailler à « diminuer le nombre des possibilités »[3] de modélisation. Or, toujours selon lui, l'aide ne peut désormais venir que des données expérimentales qui s'avèrent encore insuffisantes et donc non décisives face à ces nouvelles formulations théoriques du contrôle morphogénétique[4]. L'avancée théorique qu'il pense proposer serait donc en attente d'une avancée expérimentale. Mais, de surcroît, ce genre de travail théorique qui consiste non seulement à prouver la simple *possibilité* d'une calibration et d'une convergence vers l'expérience, mais qui met aussi en évidence le fait qu'un formalisme peut donner lieu à des *paramétrages concurrents* est, en retour, indispensable pour stimuler et orienter le questionnement empirique afin de le préparer pertinemment à son rôle d'arbitre. Pour Lindenmayer donc, le fait de se donner un tel nouveau formalisme en biologie théorique du développement indique qu'il y a désormais du travail à accomplir tant du côté théorique que du côté expérimental.

Contrairement aux propositions antérieures en simulation de la forme des plantes (dont celles d'Ulam et Cohen), il se trouve que le travail de Lindenmayer va recevoir immédiatement un assez grand nombre d'échos. Il y a ainsi pour nous matière à analyser la nature de la réception de ce qui sera bientôt appelé le formalisme des L-systèmes. Cette réception contribuera certes au mouvement de convergence entre simulation théorique et biologie végétale mais sans pourtant être la véritable « graine » autour de laquelle, par la suite et sur un tout autre terrain, précipitera et cristallisera la méthode de simulation des plantes. Pour quelles raisons ? Il est possible de les déceler si l'on rend compte auparavant de la manière dont s'est déroulée cette réception de travaux de Lindenmayer.

---

[1] Il exprimera explicitement cette idée en 1971 seulement : "These local transition rules may eventually also be interpreted in terms of the unit roles played by individual genes in development", [Lindenmayer, A., 1971], p. 456. Mais, dans le passage de 1968 auquel nous nous référons ici, l'idée nous paraît bien présente, quoique sous une forme implicite.

[2] [Lindenmayer, A., 1968b], p. 314.

[3] "narrowing down the set of possibilities",[Lindenmayer, A., 1968b], p. 314.

[4] [Lindenmayer, A., 1968b], p. 314.

CHAPITRE 19 – La réception contrastée des systèmes de Lindenmayer (1970-1975)

La réception du formalisme de Lindenmayer présente trois dimensions qui sont toutes frappantes par le caractère nettement interdisciplinaire qu'elles affichent. Tout d'abord, et assez naturellement, certains biologistes théoriciens de l'école de Waddington sont parmi les premiers à se sentir concernés et donc à réagir sur cette proposition d'une mathématisation inédite. La confrontation avec les organicistes anglo-saxons va effectivement être l'objet d'une controverse vive et très instructive du point de vue des options techniques et épistémologiques des deux parties en présence. De son côté, et par ailleurs, Lindenmayer est très vite happé par la technicité fascinante du domaine formel que son axiomatique ouvre. En un sens, son approche est d'abord, et pour longtemps, majoritairement phagocytée par les techniciens des langages formels et de l'informatique théorique. En parallèle de ces deux premiers type de réception, il est enfin un cas remarquable de conversion précoce d'un biologiste biométricien à l'axiomatisation de Lindenmayer. Ce cas est d'autant plus intéressant pour nous qu'il se produit sur le sol français. Pour finir l'exposé et l'analyse de cette réception des L-systèmes, nous tâcherons donc de comprendre les raisons qui ont motivé cette conversion, d'abord assez isolée, en ce début des années 1970.

La controverse avec Brian Carey Goodwin au sujet des formalismes « naturels »

Outre le fait que les propositions de Lindenmayer vont rencontrer très vite un grand succès, mais pas forcément d'ailleurs dans le milieu qu'il escomptait toucher au départ, un des épisodes les plus marquants et les plus significatifs qui aient succédé à ces publications de 1968 a sans doute été la controverse qui s'est ouverte sur le choix des formalismes, le mettant aux prises avec les tenants d'un certain versant théorique de l'embryologie chimique, notamment avec le biologiste théoricien Brian C. Goodwin. Présentons d'abord en quelques mots ce protagoniste.

Brian C. Goodwin est né en 1931 au Canada. Il étudia d'abord la biologie à l'Université McGill de Montréal puis les mathématiques à Oxford grâce à une bourse Rhodes. En 1961, il soutint son PhD en embryologie, à Edinburgh, sous la direction de Conrad Hal Waddington. Le titre de sa thèse était *Studies in the general theory of development and evolution*. En substance, il y conservait l'idée de son maître selon laquelle la morphogenèse ne peut entièrement s'expliquer par le réductionnisme génétique. Et il prônait, comme lui, le développement de modèles mathématiques susceptibles de montrer comment les formes vivantes sont contraintes bien davantage que le seul scénario historiciste et probabiliste des théoriciens de l'évolution ne permet de le penser. Comme Waddington, il tenait donc, non pas à réfuter, mais à amender le darwinisme par une perspective d'embryologie mathématique organiciste c'est-à-dire non réductionniste ni purement holistique.

Par la suite, après des vacations comme chercheur à McGill et au MIT[1], Goodwin devint assistant en biologie à l'Université du Sussex à partir de 1965[1]. Entre-temps, en 1963, il publia un

[1] Probablement déjà au RLE (*Research Laboratory in Electronics*) où Stuart Kauffman le rencontrera dans le bureau de Warren McCulloch en 1967. Voir [Kauffamn, S., 1995], p. 273.

livre qui connaîtra un certain succès, *Temporal organization in cells*[2], dans lequel, en s'inspirant du modèle de régulation de Jacob et Monod datant de 1961, il proposait un modèle mathématique d'expression simultanée de plusieurs gènes situés en réseau. Ce modèle du « réseau de gènes » décrivait les variations simultanées en concentrations de plusieurs protéines induites par l'expression des gènes dans une cellule. Chaque protéine voyait intervenir dans l'expression de sa variation en concentration (une dérivée première par rapport au temps) des termes multiplicatifs faisant apparaître les concentrations d'autres protéines ; ce qui donnait donc la possibilité aux autres gènes de réguler cette vitesse. Goodwin aboutissait alors à un système d'équations différentielles qui se retrouvaient couplées entre elles et qui étaient assez difficiles à résoudre[3]. Dès le début des années 1960, Goodwin était donc fasciné par les modèles de régulation et, pour lui, les ensembles autocatalytiques que l'on pouvait exprimer par des systèmes d'équations différentielles couplées devaient être considérés « comme des modèles naturels de l'intégration fonctionnelle »[4].

Or, de façon compréhensible, lorsqu'il lit les travaux de Lindenmayer publiés en 1968 dans le *Journal of Theoretical Biology*, il réagit assez négativement. En 1970, il publie un article sur la stabilité biologique dans lequel, visant implicitement Lindenmayer, il critique ouvertement le choix du formalisme des automates dans la biologie du développement[5]. Son argument revient à voir, dans ce qui se présente comme une formalisation par automates, non *pas une réelle formalisation*, c'est-à-dire une représentation formelle effective (« naturelle » au sens qu'il donne à sa qualification des « modèles naturels » différentiels) ou même une traduction approchée, mais une *simple analogie* du gène avec l'ordinateur qui, dans certains cas critiques, échoue à prendre en considération certains phénomènes biologiques essentiels. Le formalisme n'en serait donc pas réellement un : il ne serait qu'une pure « analogie formelle ». Mais voici son propos exact :

« L'implication de l'analogie du computer est que la cellule calcule [computes] son propre état, examine le programme ADN pour y chercher de nouvelles instructions et ensuite modifie son état en conformité avec ces instructions. En réalité, ce n'est pas ce que fait une cellule, bien que l'analogie formelle puisse être faite entre le comportement biochimique d'une cellule et l'opération d'un automate qui suit un programme. Il peut sembler élémentaire d'insister sur le fait que, lorsque l'on discute d'un processus tel que l'épigenèse [incluant la morphogenèse et la différenciation selon le point de vue de Waddington (note de Lindenmayer)], toutes les opérations de l'automate doivent être, à un certain égard, interprétées en termes biochimiques et physiologiques ; mais j'ai été quelque peu consterné par la somme de confusions qui se sont produites à cause du fait que

---

[1] En 1983, il deviendra professeur de biologie à l'Université Ouverte (*Open University*) en Angleterre. Il la quittera en 1996 pour devenir membre du corps professoral du *College Schumacher*, centre d'étude en écologie théorique conçu autour des idées de la *deep ecology*, de l'hypothèse Gaïa de James Lovelock et de perspectives essentiellement holistiques en écologie. Voir le site de présentation à l'adresse http://www.schumachercollege.org.uk/. Pour les précisions biographiques concernant la formation et la carrière de B. C. Goodwin, nous nous sommes appuyé sur une page de ce site : http://www.schumachercollege.org.uk/Teachers/Faculty.html#BrianGoodwin.

[2] *Temporal organization in cells*, Academic Press, London, 1963. La référence nous est précisée par [Kauffman, S., 1995], p. 273. Dans un passage autobiographique, le biologiste théoricien Stuart Kauffman nous parle de sa rencontre avec ce livre en décrivant l'amertume qui a été la sienne lorsqu'il s'est aperçu que ce qu'il projetait de faire avait déjà été traité en partie par Goodwin. Voir *ibid*., pp. 273-274. C'est dire la convergence de vues qui était la leur à l'époque. C'est montrer également combien les modèles différentiels de régulation pouvaient encore fortement inspirer les esprits.

[3] Pour cette présentation simplifiée du modèle de Goodwin, nous nous sommes appuyé sur [Bignone, F. A., 1992].

[4] Kauffman citant son ami Goodwin de mémoire : "those autocatalytic sets are absolutely natural models of functional integration", [Kauffman, S., 1995], p. 274.

[5] Pour ces indications, voir [Lindenmayer, A., 1973], p. 679.

ceux qui utilisent l'analogie du computer échouent à illustrer l'opération des instructions algorithmiques au niveau biochimique. »[1]

Pour Goodwin donc, le recours au formalisme des automates relève d'une simple analogie formelle, c'est-à-dire de la prise en compte de similitudes simplement grossières et superficielles entre les rapports qu'entretiennent entre eux les automates et les rapports qui interviennent entre les substances biochimiques dans les processus d'épigenèse. « Formel » veut donc dire ici « superficiel », c'est-à-dire « de loin », ou encore à « échelle globale ». Or, selon Goodwin, la preuve qu'il n'y a là qu'analogie grossière peut être inférée de l'embarras dans lequel on voit les tenants de la modélisation par automates lorsqu'il s'agit pour eux d'« illustrer l'opération des instructions algorithmiques au niveau biochimique ». À son tour, cet embarras ne peut pas directement se lire, mais il se donne à voir à travers la confusion qui règne autour de cette illustration. Ce que Goodwin semble dire, c'est qu'il peut exister plusieurs illustrations biochimiques différentes pour un même ensemble de paramètres d'un modèle par automates. Autrement dit, pour lui, ce « formalisme » ne capture pas assez finement et de façon univoque les phénomènes biochimiques pour être réellement dépourvu d'ambiguïtés. D'où la confusion. Alors que pour Lindenmayer, comme on l'a vu, ce formalisme est presque *trop fin* pour être calibré de façon univoque par les données expérimentales disponibles, pour Goodwin, au contraire, il n'est *pas assez fin* pour recouvrir une signification biologique univoque. En ce sens, selon Goodwin, ce formalisme manifeste bien le défaut classique d'une analogie : celui de faire violence à la réalité sur les côtés non explicites (« neutres » selon l'expression de l'épistémologue américaine Mary Hesse[2]) du rapport d'analogie et de prêter à des décisions arbitraires, source de confusion, quant à ce que l'analogie représente de son corrélat réel dans ses côtés ininterprétables.

La réponse de Lindenmayer va consister à montrer qu'il ne tient en fait qu'à l'utilisateur de ce genre de modèles de lever l'ambiguïté qui pourrait se glisser dans l'interprétation puisque « le concept d'automate fini est suffisamment général pour donner l'interprétation désirée en termes de biochimie et de physiologie cellulaire »[3]. Loin d'être un obstacle, ce serait donc au contraire la généralité du formalisme qui permettrait de lever l'ambiguïté interprétative selon Lindenmayer.

Mais Lindenmayer, afin de se faire entendre, entreprend d'abord de construire une interprétation systématique, en termes d'automates, des concepts waddingtoniens concernant les mécanismes du développement, dont l'induction et la différenciation cellulaire. Voici donc les points d'accord minimaux qu'il demande : tout gène est présent dans toute cellule de l'organisme.

---

[1] "The implication of the computer analogy is that the cell computes its own state, looks at the DNA program for further instructions, and then changes state accordingly. This is not in fact what a cell does, although formal analogy can be made between the biochemical behavior of a cell and the operations of the automaton following a program. It may seem elementary to insist that all the operations of the automaton must at some point be interpreted in biochemical and physiological terms, when discussing such a process as epigenesis [Epigenesis is meant to include both morphogenesjs and differentiation, for further explanation, see, e. g., Waddington : *Concepts and theories of growth, development, differentiation and morphogenesis*, *Towards a Theoretical Biology*, vol. 3, Edinburgh University Press, pp. 177-197] but I have been somewhat dismayed at the amount of confusion that has arisen because of the failure of those using the computer analogy to illustrate the operation of algorithmic instructions at the biochemical level", extrait de B. C. Goodwin "Biological Stability" in *Towards a Theoretical Biology*, vol. 3, Edinburgh University Press, pp. 1-17, cité par [Lindenmayer, A., 1973], p. 679.

[2] Mary B. Hesse insistait sur le rôle heuristique des modèles mécaniques par cette voie-là. Voir [Hesse, M. B., 1966, 1970], p. 8 : "Let us call this third set of properties the *neutral analogy*. If gases are really like collections of billiard balls, except in regard to the known *negative analogy*, then from our knowledge of the mechanics of billiard balls we may be able to make new predictions about the expected behavior of gases. Of course, the predictions may be wrong, but then we shall be led to conclude that we have the wrong model". En ce sens, Goodwin ne croit ici qu'à l'impact négatif de cette part non maîtrisée de l'analogie.

[3] "In fact, the concept of finite automaton is general enough to give it the desired interpretation in biochemical and cell-physiological terms, one needs only to elaborate it somewhat", [Lindenmayer, A., 1973], p. 679.

Ensuite, tout gène est présent dans chaque cellule soit sous une forme active soit sous une forme passive. Chaque cellule, à chaque instant contient donc une combinaison particulière de gènes actifs et de gènes inactifs. Les gènes actifs produisent des enzymes spécifiques qui sont capables, sous certaines conditions, de convertir divers métabolites en composants dont certains, en s'accumulant dans la cellule, causent la *différenciation cellulaire*. Le passage de l'état inactif à l'état passif (ou inversement) d'un gène est déterminé par le produit (ou inducteur) de quelque enzyme couplé avec une protéine répresseur. Si l'inducteur vient de la même cellule, on observe alors une *induction* de la synthèse d'une nouvelle enzyme qui a pour résultat une *différenciation*. S'il vient d'une autre cellule, on assiste à l'ébauche d'une nouvelle lignée cellulaire.

Après ce bref résumé[1] à vocation consensuelle, Lindenmayer soutient ensuite, et là est sa réponse, que chacun de ces *contrôles* (ou régulations) « peut être exprimé soit par l'extinction ou l'allumage [*sic*] d'un gène soit par le fait qu'ils affectent les activités des enzymes et par-là l'apparition de leurs produits »[2]. Il entreprend alors d'interpréter en termes d'automates ces points d'accord minimaux. En effet :

1) appelons C l'ensemble rassemblant les métabolites et les composants d'une cellule, mis à part les protéines actives et les acides nucléiques (que Lindenmayer appelle les « macromolécules informationnelles »[3]),
2) à chaque instant, on peut en droit définir l'*état* d'une cellule par une combinaison particulière d'éléments de C,
3) à chaque couple « gène-enzyme », on peut associer une « règle de transformation »[4]. C'est sur ce point précis que Lindenmayer avoue sa dette à la modélisation algorithmique cellulaire introduite par Walter R. Stahl[5]. Donc en un sens, la légitimité de la modélisation par automates dans la biologie du développement repose en partie sur celle, antérieure, de cette même modélisation en biologie moléculaire. Bref, à chaque cellule on pourra associer une combinaison de règles de transformations selon que les gènes correspondants seront actifs ou non à l'instant considéré.

Finalement, l'*état interne total* d'une cellule comportera à la fois la combinaison de ses composants et la combinaison de ses règles de transformation. L'*entrée* d'une cellule consistera en l'ensemble des composants, éléments de C, qui dans l'intervalle de temps (discrétisé) se seront nouvellement présentés et la *sortie*, à savoir l'ensemble de ceux qui se seront dissipés. On voit dès lors que, en conformité avec les concepts de la biologie du développement précédemment rappelés, l'*état prochain* ne pourra dépendre que de l'état présent, des entrées et des sorties. Ainsi, il sera en droit possible de construire des fonctions de transition qui détermineront la combinaison prochaine de composants dans chaque cellule comme la combinaison prochaine de règles de transformation. Et Lindenmayer conclut ce passage ainsi :

« On peut voir que les deux fonctions (état-prochain et sortie) peuvent en principe être construites pour une population donnée de cellules ; ainsi les cellules peuvent être représentées de façon valide par des automates finis. Je ne peux donc pas être d'accord avec les objections de

[1] Dont nous avons proposé ici une traduction partielle et adaptée : voir [Lindenmayer, A., 1973], p. 679.
[2] "… all of these controls can be expressed as either turning on and off the genes, or as affecting the activities of the enzymes and thus the appearance of their products", [Lindenmayer, A., 1973], p. 680.
[3] "informational macromolecules", [Lindenmayer, A., 1973], p. 680.
[4] "transformation rule", [Lindenmayer, A., 1973], p. 680.
[5] Voir [Lindenmayer, A., 1973], p. 680, note 3.

*Goodwin. Ce qu'il appelle le' programme ADN' est l'ensemble des règles de production que nous avons introduites, et en accord avec notre courte discussion précédente, on peut dire d'une manière complètement naturelle que l'état prochain d'une cellule est calculé [*computed*] en utilisant ces règles de productions. »*[1]

Nous ne savons pas si Lindenmayer connaît à cette époque l'argument de Goodwin sur la naturalité des modèles différentiels de régulation. Toujours est-il que nous sommes là face à une évidente et suggestive confrontation entre deux interprétations différentes de ce que devrait être un *modèle mathématique naturel*. Pour Goodwin, la naturalité est du côté des modèles différentiels parce que le corrélat réel du formalisme demeure ambigu ; pour Lindenmayer, elle est du côté des modèles à automates parce qu'ils ont la capacité de traduire très précisément et sans ambiguïté les concepts théoriques déjà élaborés : c'est pour lui la naturalité d'une compréhension, c'est la proximité d'un signe par rapport à son sens, alors que Goodwin cherche la naturalité d'une référence et valorise ainsi la proximité du signe formel et du référent réel. En un sens, nous pouvons dire que la naturalité du modèle chez Goodwin est ontologique, alors que chez Lindenmayer, en conformité avec son logicisme qui lui vient de Woodger, elle est gnoséologique et symbolique.

Par ailleurs, on peut déjà voir dans la critique de Goodwin un des foyers de résistance à la modélisation et à la simulation par automates dans la biologie du développement. De manière non surprenante, elle a sa source dans l'école waddingtonienne et organiciste. Après le modèle de Turing et avant même la reprise des postures de cette biologie théorique par René Thom, elle en est une première forme accomplie.

Parvenu à ce point de notre restitution du travail de Lindenmayer, de sa signification épistémologique et de sa réception, il nous est désormais nécessaire de dire quelques mots de la réception de ces travaux dans d'autres contextes. Comme on peut le comprendre avec la réaction de Goodwin, Lindenmayer ne pouvait pas espérer grand-chose du côté de la biologie théorique américaine. La carrière du biologiste modélisateur sera en fait transformée et accélérée à partir d'une convergence inattendue. C'est cette convergence qui va l'inciter à développer de manière toujours assez formelle son approche de la modélisation et de la simulation de la morphogenèse végétale par ordinateurs.

Un déplacement de l'horizon des automates vers l'horizon des langages

Ce qui est en effet surprenant lorsque l'on suit la bibliographie des travaux de Lindenmayer comme de ceux qui le citent dès 1969, c'est le fait que l'on a par la suite très peu affaire à des biologistes. Le premier à faire écho à ses travaux de modélisation mathématique, par exemple, est Gabor T. Herman. C'est un mathématicien britannique né au début des années 1940 et qui a soutenu son doctorat en mathématiques à l'Université de Londres en 1968. En 1969, on le retrouve au poste de professeur assistant puis de professeur associé au Département de *Computer Science* de l'Université d'Etat de New York, à Buffalo. Même s'il publie aussi dans le *Journal of Theoretical Biology*, ce qui l'intéresse dès le départ dans le modèle de Lindenmayer,

[1] "It can be seen that both the next-state and the output functions can in principle be constructed for a given population of cells, thus the cells can be validly represented by finite automata. I cannot agree, therefore with Goodwin's objections. What he calls the 'DNA program' is the set of production rules we introduced, and according to our short discussion above it can be said in a completely natural way that the next state of a cell is computed by using these production rules", [Lindenmayer, A., 1973], p. 681.

c'est essentiellement sa capacité de calcul universel en comparaison des autres types d'automates et sa propriété de fermeture en termes de langage formel[1]. C'est lui qui nomme le « modèle mathématique » proposé par Lindenmayer un « modèle de Lindenmayer »[2]. Par son travail, Herman contribue surtout à épurer la présentation de Lindenmayer pour lui donner une forme axiomatique recevable par des mathématiciens : pour lui, comme le précise Lindenmayer lui-même, un « modèle de Lindenmayer » est un « construit » rassemblant un ensemble fini d'états, une fonction d'état-suivant et un tableau linéaire initial[3]. C'est Herman encore qui, dès 1968 semble-t-il, fait prendre conscience à Lindenmayer qu'un tel construit formel est analogue aux grammaires au sens de la théorie des langages formels[4].

Ce dernier va donc progressivement passer d'une vision de son modèle conçue dans l'horizon de la théorie des automates à une reprise de ce même modèle dans l'horizon interprétatif de la théorie mathématique des langages. Dans ses écrits, c'est souvent le terme « langage » qui va remplacer le terme « automate » ou l'expression « machine séquentielle ». À partir de ce moment-là, le langage de Lindenmayer devient donc un objet d'intérêt et d'étude en lui-même. Et ce déplacement vers l'horizon de la théorie des langages va ouvrir à ce formalisme des dimensions d'évolution différentes de celles qui pouvaient sinon s'ouvrir à un simple modèle mathématique de biologie du développement. Ce formalisme donc, relativement élémentaire dans ses règles et riche en appels à l'intuition à cause de cette simplicité même, dès lors qu'il est perçu et conçu comme assimilable à l'objet mathématique « langage formel » va faire l'objet d'études pour lui-même, comme un construit mathématique parmi d'autres.

Par la suite, Gabor T. Herman s'orientera dans la reconnaissance de formes et dans la synthèse d'images médicales par ordinateur. Il deviendra un des spécialistes de l'analyse théorique et informatique des images issues de la tomographie médicale[5]. Il abandonnera donc l'aspect synthétique des modèles formels pour se pencher sur une approche analytique de reconnaissance de formes, c'est-à-dire sur une approche de spécification de modèles et d'identification de paramètres. En revanche, de son côté et avec d'autres collaborateurs, Lindenmayer poursuivra davantage encore, et de lui-même, cette inflexion vers la théorie des langages mais en quittant auparavant le contexte purement américain[6].

Convergence entre genèse de phrases et morphogenèse végétale

En effet, pendant l'année universitaire 1968-1969, Lindenmayer, toujours grâce à un fond du *Public Health Service* des Etats-Unis, poursuit ses recherches aux Pays-Bas, dans le laboratoire Hubrecht de l'Académie Royale des Sciences et des Lettres. C'est un laboratoire de biologie du développement. Cependant, dans un premier temps, il ne trouve là-bas aucun collègue biologiste avec lequel collaborer réellement et poursuivre ses travaux. Il prend donc très vite contact avec les mathématiciens et informaticiens de l'université d'Utrecht dont D. Van Dalen, G. Rozenberg, P. G. Doucet et J. Van Leeuwen[7]. Il travaille en fait exclusivement avec eux.

---

[1] Voir [Lindenmayer, A., 1973], p. 690.
[2] [Lindenmayer, A., 1973], p. 682.
[3] [Lindenmayer, A., 1973], p. 682.
[4] Il se peut également que ce soit un des linguistes d'Utrecht…
[5] Voir [Herman, G. T., 2003] pour les indications biographiques.
[6] Voir [Lindenmayer, A., 1971], [Lindenmayer, A., 1973] et [Lindenmayer, A., 1975].
[7] Dans [Lindenmayer, A., 1971], p. 477, Lindenmayer les remercie tous de l'aide qu'ils lui ont fourni pour l'« aspect mathématique ».

De leur point de vue, ces chercheurs en mathématiques et en théorie des automates s'aperçoivent immédiatement que ce biologiste leur propose quelque chose qui ne leur est pas inconnu et qu'ils peuvent aisément classer parmi les objets formels qu'ils ont coutume d'étudier. De fait, des linguistes comme Chomsky ont déjà établi des parallélismes avec leur approche des questions de langage. On se souvient en effet qu'entre-temps la linguistique a poursuivi son tournant formel puis « modéliste » et a rejoint, elle aussi, sur bien des points la théorie mathématique des langages. Avec les travaux de Chomsky sur les grammaires formelles génératives (1957)[1], ce rapprochement s'est considérablement accentué car, dans ce cadre-là, l'enjeu n'est pas purement mathématique mais rejoint bien le type de question que peut se poser la linguistique en tant que science humaine : existe-t-il une infrastructure formelle éventuellement innée susceptible de déterminer axiomatiquement la forme que prennent toutes les grammaires rencontrées dans les divers langages humaines ? Cette question, pour Chomsky, rejoint donc celle de l'innéité de certaines compétences chez l'homme, en l'occurrence les compétences linguistiques. Comme la théorie de Chomsky séduit mais est en même temps très controversée durant ces années 1960, la linguistique formelle est assez naturellement sensible à toute forme d'axiomatisation alternative des langages formels. D'où son rapprochement avec les recherches les plus récentes de la théorie des langages.

L'épistémologie de Chomsky est nettement modéliste et en même temps explicative. Il refuse d'avoir une approche purement statistique et descriptive des phénomènes linguistiques, même si leur forme discrète y prête naturellement, comme les cellules vivantes des pluricellulaires. C'est donc en cherchant des modèles de génération de phrases à partir de phrases noyaux, plus courtes, que Chomsky élabore la proposition de « règles de réécriture ». Et c'est bien autour de cette notion précise qu'il y a, après coup, une convergence formelle avec les « modèles de Lindenmayer ».

Comme elles procèdent l'une et l'autre d'un rejet des modèles phénoménistes, probabilistes et informationnels du type de ceux de Jakobson et Halle, ou de Shannon et Weaver, on peut comprendre qu'intrinsèquement, l'épistémologie de Lindenmayer et celle de Chomsky se rejoignent et qu'elles ne peuvent pas prêter exactement au même type de rencontre entre linguistique et biologie que celle qui a déjà eu lieu de 1960 à 1967 entre le statisticien Murray Eden, le linguiste Morris Halle et le botaniste, biologiste et théoricien du développement, Dan Cohen. Cette première rencontre tripartite (mathématique, linguistique, biologie théorique), nous l'avions vu, donnait en effet une place centrale à la simulation et à la visualisation par ordinateur. La seconde, quant à elle, même si elle se sert également d'ordinateurs pour déduire des comportements, ne recourt pas à des générateurs de nombres aléatoires ni à des tentatives de visualisation directe sur la machine car elle s'enracine d'abord dans une approche mathématique foncièrement différente : la logique symbolique, les langages formels et les mathématiques intuitionnistes et constructivistes du discontinu, c'est-à-dire le domaine alors en plein essor de l'informatique théorique.

Ainsi, comme ils l'avaient fait auparavant pour la linguistique formelle de Chomsky, il devient naturellement possible aux mathématiciens spécialistes d'informatique théorique d'intégrer ou plutôt de réintégrer (puisque l'emprunt de Lindenmayer à la théorie des automates, comme celui de Chomsky, est dès le départ explicite[2]) le « modèle de Lindenmayer » dans leurs propres recherches sur les langages formels. Avec Lindenmayer, ils vont même d'abord travailler à

[1] Pour des précisions au sujet du modélisme de Chomsky, nous renvoyons à notre annexe C.
[2] Ce qui ne veut pas dire que Lindenmayer a emprunté à Chomsky.

comparer les grammaires de Chomsky avec le nouveau langage que construit ce modèle né originellement dans la biologie théorique.

De son côté donc, c'est-à-dire du point de vue de la biologie, dans un article de 1971, Lindenmayer établit pour la première fois explicitement le parallélisme entre les systèmes formels développementaux qu'ils proposent pour la modélisation de la croissance d'organismes unilinéaires simples et les grammaires des linguistes comme celles de Chomsky :

« De même que les linguistes théoriciens sont concernés par des règles de production ou des règles de transformation au moyen desquelles certain types de mots ou de phrases peuvent être générés, de même sommes-nous concernés par la découverte d'instructions développementales au moyen desquelles des types d'organismes connus peuvent être générés. Ainsi on doit considérer les construits génératifs des linguistiques, appelés grammaires, comme étant en relation avec nos systèmes. Cela peut énormément aider ; d'autant plus qu'une relation d'ordre existe déjà au regard des grammaires abstraites et des langages (la hiérarchie des grammaires de Chomsky), relation que l'on peut utiliser pour nous fournir un ordre dans les systèmes développementaux génératifs et les langages ; ce qui nous donne une mesure de complexité de par la distinction que l'on peut établir entre les caractères primitifs et avancés, alors même qu'aucune mesure de cette sorte n'était auparavant disponible pour les biologistes. »[1]

Dans cet article du *Journal of theoretical biology*, Lindenmayer, après avoir établi une analogie explicite entre le travail des linguistes théoriciens et celui des biologistes théoriciens du développement, tient donc à insister sur le profit que la biologie pourrait immédiatement en tirer. Tout d'abord, il lui paraît possible de transférer les relations d'ordre déjà établies entre différents langages selon leur complexité aux processus biologiques de développement eux-mêmes. Le formalisme mathématique, s'étant en quelque sorte déjà abreuvé à la source d'une autre science, ferait ainsi refluer sur le domaine qu'il modélise nouvellement les propriétés intrinsèques qu'on lui a trouvées par ailleurs. Ce formalisme étant intuitif, malgré le fait que les propriétés que l'on trouve grâce à lui restent éminemment formelles, c'est-à-dire intrinsèques à lui-même (d'où d'ailleurs leur transférabilité au-delà des frontières traditionnelles entre disciplines), il est néanmoins possible, selon Lindenmayer, que ces propriétés correspondent à des propriétés biologiques effectives. Contre toute attente, cultiver le formalisme pour lui-même pourrait donc avoir là une conséquence heuristique dans l'éventuelle production de concepts à signification pleinement biologique.

Un peu plus bas, Lindenmayer donne un exemple : dans la théorie des langages, on peut montrer qu'un certain nombre de langages, en ayant une axiomatique et des règles de production très simples, sont capables de développements aussi complexes que bien des langages à définition apparemment plus complexe[2]. Il nous l'avait d'ailleurs démontré dès les articles de 1968 : devant la tâche de modéliser un développement biologique, on se trouve souvent face à des modèles concurrents de nature différente mais dont la performance est identique ou très proche. Il y a donc fréquemment une sous-détermination des règles de réécriture du L-système.

[1] "Just as the theoretical linguists are concerned with production rules or transformation rules by which certain types of words or sentences can be generated, so are we concerned with finding developmental instructions with which known kinds of organisms can be generated. Thus we shall consider the generating constructs of linguists, called grammars, in relation to our systems. It is very helpful, furthermore, that an ordering relation exists already with respect to abstract grammars and languages (the Chomsky hierarchy of grammars), which we can utilize to provide us with an ordering of developmental generating systems and languages, giving us a measure of complexity in distinguishing primitive vs. advanced characters, whereas non such measure has been available before to biologists", [Lindemayer, A., 1971], p. 456.

[2] [Lindenmayer, A., 1971], p. 457.

Pour son travail heuristique, le biologiste peut en conséquence choisir de se restreindre d'abord à l'emploi du type de L-système le plus simple : celui dans lequel les cellules n'ont pas d'interaction (« zéro interaction »), celui dans lequel il n'y a aucune information qui circule entre elles, ceux que G. T. Herman appelle les 0L-systèmes. Ces types de L-systèmes, parce qu'ils sont formellement plus simples, peuvent conduire à davantage de connaissances démontrées par théorèmes : la théorie des langages est donc assez complète en ce qui les concerne. En outre, ils montrent (ou confirment selon Lindenmayer) qu'il n'est pas impossible que la cellule biologique soit fortement autonome dans la construction des êtres pluricellulaires. Elle ne serait ainsi fortement contrainte que par son « lignage » [« *lineage* »], son arbre généalogique en quelque sorte[1], et non pas tant par son voisinage.

Il faut cependant ajouter que Lindenmayer a l'opportunité de présider à ce rapprochement ente biologie théorique et linguistique pour une autre raison qu'il ne faut pas non plus négliger. Tout d'abord, il paraît certain qu'en 1968, Lindenmayer souhaite travailler avec ces collègues non biologistes parce qu'ils lui trouvent un intérêt *a priori*. En restant en Hollande, il peut donc saisir là une occasion assez unique de collaborer avec des collègues qui sauront peut-être plus qu'ailleurs l'écouter et amplifier ses travaux. En effet, aux Pays-Bas, rappelons-le, dans la suite de l'impulsion initial du mathématicien Luitzen Egbertus Jan Brouwer (1881-1966), notamment au travers de ses publications, de ses cours et de ses directions de travaux à l'Université d'Amsterdam, dont ceux de Arendt Heyting (1898-1980)[2], l'école intuitionniste est très vivace. Dans les années 1960, cette école est encore très représentée à Amsterdam, notamment en la personne de Dirk Van Dalen (né en 1932)[3] qui, avec son collègue et assistant d'origine polonaise Gzregorz Rozenberg[4], fréquentera Lindenmayer avec intérêt dès 1969. C'est même au mathématicien Dirk Van Dalen que l'on doit l'invention, en 1971, de l'expression « L-système » pour désigner de façon abrégée le modèle de Lindenmayer[5].

---

[1] Voir [Lindenmayer, A., 1975], p. 9.

[2] Dans sa thèse de doctorat de 1925, Heyting, mettant en œuvre quelques unes des idées générales de Brouwer, avait en effet proposé la première axiomatique intuitionniste pour la géométrie projective avant d'étendre par la suite ses suggestions à l'algèbre (en 1941) puis aux espaces de Hilbert dans les années 1950. Heyting avait alors été assistant à l'Université d'Amsterdam en 1936, puis professeur en 1948, jusqu'à sa retraite en 1968. En septembre 1930, au symposium de Königsberg sur la Connaissance (*Erkenntnis*), Heyting avait représenté le front intuitionniste face à Carnap qui incarnait déjà le front logiciste et à von Neumann qui soutenait une position formaliste. Pour ces informations, nous nous sommes notamment appuyé sur le site d'histoire des mathématiques de l'Université Ecossaise de Saint-Andrews accessible à l'adresse http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/history/Mathematicians.

[3] Dirk van Dalen est né à Amsterdam en 1932. Il fait des études de mathématiques à l'Université d'Amsterdam et, en 1963, sous la direction du professeur Arendt Heyting, ancien élève de Brouwer (voir note *supra*), il soutient une thèse de géométrie projective du plan où il adopte l'approche délibérément intuitionniste de Heyting. Entre 1964 et 1966, c'est au MIT que l'on retrouve van Dalen. En 1967, ce dernier revient en Hollande et est nommé lecteur à l'Université d'Utrecht où, en 1969, il fait la connaissance de Lindenmayer avant qu'il y devienne professeur en 1979, jusqu'à sa retraite en 1993.

[4] Grzegorz Rozenberg est né en Pologne au milieu des années 40. En 1965, il est ingénieur diplômé en informatique de l'Université Technique de Varsovie. Il soutient son doctorat en mathématiques en 1968 auprès de l'Académie des Sciences de Pologne où, par la suite, il exercera quelques temps comme professeur assistant. En 1969, on le retrouve à l'Université d'Utrecht aux côtés du lecteur en mathématiques qu'est alors van Dalen. C'est précisément là qu'il a l'opportunité de rejoindre Lindenmayer. Il cosignera quelques articles avec lui. Il sera par la suite professeur assistant à l'Université d'Etat de New York (Buffalo) où il rejoindra pour un temps Gabor T. Herman. Il dirige actuellement (2003) le Département d'Informatique (*Computer Science*) de l'Université de Leiden. Il est également professeur adjoint d'informatique à l'Université Boulder (Colorado). Pour ces informations, nous nous sommes notamment aidé du site personnel de G. Rozenberg accessible à l'adresse http://www.liacs.nl/~rozenber.

[5] [Lindenmayer, A., 1973], p. 682.

Ce que la biologie apporte à l'informatique : un nouveau modèle de computation

Pour comprendre comment la rencontre a pu se produire, il est cependant essentiel de saisir ce que les mathématiciens d'Utrecht trouvent d'intéressant de leur propre point de vue dans les systèmes développementaux de Lindenmayer, ce sans quoi ils n'auraient sans doute pas sollicité la collaboration du biologiste. Lorsqu'ils découvrent Lindenmayer, ces mathématiciens sont en fait déjà très impliqués dans des recherches d'informatique théorique dans lesquelles on a pris l'habitude de se proposer et de mettre au point divers *modèles de computation* : les langages formels de la mathématique. Au contraire des mathématiciens formalistes, les informaticiens n'étudient donc pas les « langages formels » uniquement pour eux-mêmes ou pour leur beauté ou leur systématicité ou leur généricité. Une des questions essentielles, pour eux, y est plutôt de savoir comment *faire pratiquer* tel ou tel calcul *effectif* (*computation*) par une machine réelle (ou encore sur le papier), avec quelle chance de réussite, avec quelle chance de le voir se finir, et en combien de temps, etc. Or, contrairement à ce à quoi l'on aurait pu s'attendre, c'est-à-dire malgré le fait qu'elle n'ait pas suivi une approche formaliste du type de celle qu'affectionnaient certains concepteurs de l'ordinateur comme von Neumann, l'école hollandaise de mathématique, de par la persistance même de son intuitionnisme, se sent finalement très concernée par ces questions difficiles de computation dans la mesure où elle a l'habitude de concevoir philosophiquement les mathématiques comme une activité pratique, quasi-expérimentale et dont l'achèvement n'est jamais certain *a priori*. Malgré le paradoxe apparent, on peut donc comprendre qu'une fois que les ordinateurs, à la conception desquels elle a peu participé, sont à disposition, elle développe en fait très tôt une école brillante d'informatique théorique.

Dans les premières années de sa présence à Utrecht, au contact avec G. Rozenberg, Lindenmayer se rend donc aux colloques de l'*ACM* (*Association for Computing Machinery*). Il y apprend et adopte les techniques de comparaison des langages formels. Dans sa proposition, ce qui intéresse visiblement les informaticiens tient dans un premier temps au fait qu'il s'agisse d'un système formel à réécriture, comme c'était le cas pour les grammaires de Chomsky. La simplicité de l'implémentation logicielle ou matérielle de ce genre de technique de calcul fait qu'elles bénéficient en effet d'une certaine faveur parmi les informaticiens. Dans un second temps, et c'est là ce qui fait leur caractère essentiel et réellement innovant au regard des informaticiens, les L-systèmes, à la différence des grammaires génératives, sont des systèmes formels à *réécriture simultanée à chaque pas de temps*. C'est-à-dire qu'à chaque instant, chacun des éléments de la chaîne de symboles se voit appliquer une des règles de réécriture en fonction de son état, de ses entrées et de l'état de ses voisins. Pour Rozenberg, c'est cette idée qu'il faut reconnaître comme l'apport le plus important et comme n'ayant pu naître que dans un cadre où le modélisateur pensait à des cellules vivantes *actuellement coexistantes*, c'est-à-dire en biologie[1]. Pour Rozenberg et Lindenmayer, c'est donc la biologie qui a donné l'idée aux informaticiens d'introduire *la simultanéité* dans les grammaires à réécriture de manière à produire des modèles de computation nouveaux et éventuellement plus performants pour des problèmes d'ordre plus général.

[1] "As required by biological considerations these functions must be applied to all cells in the array simultaneously at each step. Thus one obtains infinite sequences of arrays once the functions and the initial arrays are specified", [Rozenberg, G. et Lindenmayer, A., 1972], *abstract*.

Caractérisation, inférence, complexité

Pendant une vingtaine d'années, de nombreux travaux vont donc se succéder sur les L-systèmes avec un point de vue essentiellement théorique, c'est-à-dire avec une approche où la collaboration entre biologie du développement, théorie mathématique des langages et informatique se construit à un niveau essentiellement conceptuel. Il y aura alors une sorte de division du travail : les logiciens et mathématiciens comme G. T. Herman, mais aussi J. van Leeuwen[1] et A. Salomaa[2] s'occuperont de la *caractérisation* des L-systèmes, c'est-à-dire de l'exhibition des propriétés mathématiques des diverses classes de ces systèmes génératifs[3], le but étant de prouver l'impossibilité pour certaines de générer telle séquence de structures. Ce travail, apparenté au test théorique des modèles de computation, mène à une classification et à une comparaison systématique de la puissance des langages ainsi conçus. Herman, pour sa part, s'occupera d'abord plus particulièrement (en 1971) de l'*inférence syntaxique*, c'est-à-dire de l'activité précise qui consiste à essayer de trouver un système génératif correspondant à une structure initialement donnée ou observée. Par la suite, entre 1972 et 1975, avec l'aide des ingénieurs R. Baker, W. H. Liu et Gordon L. Schiff et grâce aux fonds de la *National Science Foundation*, il conçoit CELIA (*CEllular Linear Iterative Array Simulator*)[4] un programme informatique en FORTRAN permettant de simuler sous forme de tableau de chiffres des organismes unilinéaires ou arborescents obéissant à des L-systèmes. Pour lui, le recours à un tel dispositif grossier de « simulation » ne permet pas encore de réfuter ou de valider une hypothèse biologique (ici en l'occurrence la pertinence de la notion d'« information positionnelle »[5] telle que Lewis Wolpert l'avait introduite en embryologie en 1969[6] et que Herman reprend en 1975), mais seulement de montrer la potentialité qu'ont en général les L-systèmes à prendre en charge, à l'avenir, de tels tests, une fois que l'on aura des données quantitatives plus précises[7].

Lindenmayer, de son côté, tirera des leçons essentiellement théoriques, pour la biologie, de ces recherches sur le formalisme ; et il se penchera surtout sur la signification biologique des systèmes ainsi préconisés par les informaticiens. Assez rapidement, dès 1974, il présentera une vue déjà très générale sur les recherches impliquant les L-systèmes. Cela fera l'objet d'une longue intervention de sa part à la Conférence sur la Théorie des Automates Biologiquement Motivés

---

[1] Un jeune mathématicien qui deviendra chercheur et professeur en informatique théorique (spécialité : modèles de computation) à l'Université d'Utrecht. J. van Leeuwen est encore en activité à l'*Institute of Information and Computing Sciences* de cette université.

[2] Arto Salomaa est né en Finlande en 1934. Il soutient son doctorat en mathématiques à l'Université de Turku en 1960. Son sujet porte sur la composition de fonctions à plusieurs variables et à valeur sur un ensemble fini. Il s'intéresse donc au départ à la logique et aux mathématiques finitistes avant de se pencher par la suite sur les algèbres finies en général, puis sur la théorie des automates et sur les grammaires formelles. C'est donc assez naturellement qu'au début des années 1970, il rencontre les L-systèmes. Pour sa bibliographie complète, nous renvoyons au site qui se trouve à l'adresse suivant : http://www.sci.utu.fi/mat/tucs/artount9.html. Il a fait toute sa carrière au Département d'Informatique de l'Université de Turku.

[3] [Prusinkiewicz, P et Lindenmayer, A., 1987], p. 242.

[4] [Herman G. T. et Schiff, G. L., 1975], p. 35. Voir également [Lindenmayer, A., 1975], p. 7.

[5] Lewis Wolpert définit l'« information positionnelle » comme la spécification de la position d'une cellule dans un système organique en développement par rapport à un ou plusieurs points du système. L'information positionnelle est elle-même étroitement liée au génome de la cellule et à son histoire développementale. C'est elle qui détermine la différenciation moléculaire de la cellule. Voir [Herman G. T. et Schiff, G. L., 1975], p. 39.

[6] Même si les historiens des sciences qui ont parlé de Wolpert ne nous semblent pas l'avoir fortement noté (par exemple [Keller, E., F., 2002, 2003], 176-183), il nous paraît très possible, mais pas certain, que ce concept lui ait été inspiré par la fréquentation de son élève Apter. Voir [Apter, M. J., 1966], pp. 140-141. Ce dernier, au sujet de son propre modèle à flux d'informations (voir *supra*), parle en effet d'une nécessité de supposer que la cellule sache où elle se trouve (*ibid*., p. 140). D'autre part, c'est ensemble qu'Apter et Wolpert avaient publié ce modèle conçu en fait par Apter dès 1965, dans le *Journal of Theoretical Biology*, vol. 8, pp. 244-257.

[7] [Herman G. T. et Schiff, G. L., 1975], p. 38.

(Virginie, Etats-Unis, juin 1974). C'est notamment là qu'il s'affrontera à la notion de *complexité* : il lui apparaîtra de plus en plus qu'avec les L-systèmes, on possède une mesure de la complexité biologique du développement bien plus crédible que celles que proposent les cybernéticiens avec la mesure de l'information de Shannon ou de Kolmogorov. En effet, d'une part, ces mesures informationnelles de la complexité imposent de se représenter l'être en développement sous une forme statique. Elles ne rendent donc pas du tout compte, même de manière simplifiée, de la spécificité d'un phénomène de morphogenèse : au contraire, on a là affaire à un système éminemment dynamique. D'autre part, comme il le précisera bien plus tard dans un article de 1987 :

« L'application des mesures d'information ou d'entropie à des processus affectant des êtres organiques n'a jamais été un succès pour cette autre raison que ces mesures sont définies pour une transmission d'information (une communication) d'une source à un récepteur à travers un canal. Dans les organismes, ces composants ne sont pas identifiables. Par exemple, le contenu informatif de l'effectif entier en ADN d'une cellule vivante est immensément grand et il n'y a aucun moyen de trouver comment et quelle partie de cet effectif est actuellement utilisé pendant la durée de vie de la cellule. »[1]

Pour Lindenmayer donc, comme on ne peut « identifier » intuitivement les composants (source, récepteur, canal) nécessaires à la juste application du formalisme informationnel, ce formalisme n'est pas valable pour la mesure de la complexité biologique. Il faut donc trouver un niveau biologique qui permette d'appliquer un formalisme qui soit à la fois réaliste et intuitif, cela, d'une part, afin de crédibiliser les enseignements sur la complexité que l'on peut tirer de ce formalisme, d'autre part afin que ces enseignements ait une signification biologique immédiate. Or, c'est bien le cas du niveau cellulaire et de son traitement par les L-systèmes, selon Lindenmayer. Nous pouvons donc le constater, comme Chomsky le fit en son temps, l'approche modélisatrice de type phénoméniste et informationnelle à la Shannon est ici critiquée par Lindenmayer en ce qu'elle ne permet aucun inférence théorique valable pour le domaine d'application considéré : la biologie du développement.

Pour finir sur cette nouvelle école d'algorithmique, il faut retenir l'idée que la modélisation, ou simulation algorithmique (même si le terme n'est pas prioritairement revendiqué ici), issue d'une certaine biologie du développement a été à l'origine de deux convergences : partielle entre la simulation sur ordinateur et la réalité biologique, quasi-totale entre la modélisation logiciste et les théories des langages. Ce sont ces deux convergences, et surtout la seconde, qui ont contribué à la fixation de cette méthode de modélisation dans les productions scientifiques. Ce qui caractérise ce type de modélisation est l'attention aux formes concrètes discrétisées mais aussi le refus du hasard. Son objectif reste donc en fait théorique : il est assez proche des théories structuralistes contemporaines qui ne se présentaient que comme des modèles à prétentions théoriques, c'est-à-dire prétendant encore dire quelque chose de l'essence des mécanismes sous-jacents aux phénomènes, malgré un déracinement assumé par ailleurs. Le structuralisme, en ce sens, reste fermement attaché au refus de la dispersion. Mais, ce que nous montre l'histoire de cette

[1] "The application of information or entropy measures to processes of living organisms has never been successful for the additional reason that these measures are defined for information transmission (communication) from source to receiver over a channel. In organisms these components are not identifiable. For instance, the information content of the entire DNA complement of a living cell is immensely large and there is no way of finding out how and what part of it is actually used during the life time of the cell", [Prusinkiewicz, P. et Lindenmayer, A., 1987], p. 245.

rencontre particulière, c'est que, malgré ce qu'en disent leurs promoteurs, ces convergences sont plus de forme que de fond. C'est même cela qui fait la possibilité de la convergence. La nature de la convergence reste donc ici de celles que nous avons appelées « absorbantes » : elle est interne au formalisme, mathématique. Au cours des années 1970, Lindenmayer, comme ses collègues, se plaisent ainsi à ramener tel langage à tel autre, à trouver la catégorie la plus large ou la plus étroite pour ces langages. Ils le font certes pour servir à des desseins techniquement et objectivement fondés. Mais ils le font aussi pour chasser la dispersion à quoi le déracinement, par ailleurs assumé, pourrait nous condamner.

Cependant, la générativité de ces langages, le fait qu'ils ne forment pas le plus souvent un système clos et qu'il faille les faire fonctionner pour voir comment ils fonctionnent, le fait que ce soit donc souvent une difficulté mathématique majeure de dire ce qu'ils sont capables de décrire puisqu'on ne peut pas toujours le savoir *a priori*, témoigne de la naissance d'un type nouveau de modèle : ouvert, génératif pas à pas et constructif. Or, intrinsèquement, la prise en charge de ce type de modèle nécessite le recours à un ordinateur, c'est-à-dire à une machine capable de réitérer en grand nombre des règles élémentaires valant sur un substrat formel spatialisé et dont la topologie change au cours du temps. Joignant l'hétérogénéité spatiale avec la répartition locale des règles, ils s'apparentent à ce que Cournot décrivaient comme des jeux historiques[1]. Permettant des rencontres entre des règles réparties, même sans hasard objectif (ou simulé), ces modèles sont en effet générateurs d'une certaine historicité dans l'espace. Fermés à la dispersion formelle, ils sont donc potentiellement ouverts à la créativité irréductible et interne de leur modélisation.

Au vu du nombre raisonnable des travaux qui ont rapidement été inspirés par les L-systèmes, il nous paraît incontestable que la biologie théorique ait gagné par là une plus grande audience dans la production scientifique. Ce certain engouement pour l'approche algorithmique en modélisation mathématique est important à signaler car il contribuera ensuite à relancer et à étendre un certain nombre de recherches en biologie théorique, notamment en France, à partir du début des années 1980. Afin de montrer la réalité et la force (certes à relativiser) de cet engouement dès le milieu des années 1970, il nous suffira d'évoquer maintenant le revirement d'un couple de chercheurs français en poste au Laboratoire de Botanique Analytique et de Structuralisme Végétale : Hermann et Jacqueline Lück. Leur laboratoire est alors rattaché à la Faculté des Sciences et Techniques de Saint-Jérôme, à Marseille. Ce cas est particulièrement instructif car il témoigne du fait que, dans le versant botanique de la biologie théorique, la modélisation algorithmique, issue de la théorie des automates et des langages, s'est pensée comme une alternative théorique et formelle à l'analyse statistique mais non essentiellement comme une stratégie instrumentale à visée opérationnelle. Les Lück sont ainsi passés d'une approche de modélisation statistique à une approche de modélisation algorithmique. Toutefois, dans un premier temps, les Lück auront tendance à chercher encore la calibration de leurs L-systèmes. Mais, par la suite, un peu comme Lindenmayer lui-même, aspirés par le domaine ouvert et inexploré des langages et de leur empirie, ils emprunteront une voie plus franchement théorique. L'ordinateur ou l'automate y servira alors uniquement de modèle formel : il ne constituera même pas un instrument concret permettant l'expression ou la manipulation effective de ces nouveaux formalismes. Tâchons maintenant de comprendre ce qui a fait que la rencontre

[1] « ... car non seulement les coups se succèdent [au tric-trac et aux échecs], mais ils s'enchaînent en ce sens que chaque coup influe plus ou moins sur la série des coups suivants et subit l'influence des coups antérieurs », *in Essai sur les fondements de la connaissance et sur les caractères de la critique philosophique*, 1851, [Cournot, A. A., 1838-1877, 1958], p. 181.

des Lück avec les L-systèmes a été déterminante pour eux. Dans leur domaine, ce travail a constitué très tôt une des rares alternatives françaises à la modélisation pragmatique mais sans jamais pourtant pouvoir en inquiéter réellement l'hégémonie. Ce qui confirme encore que la dispersion demeure à cette époque aussi à ce niveau-là, à savoir entre les propositions d'explication et les propositions d'utilisation.

De l'analyse statistique à la modélisation algorithmique : Hermann et Jacqueline Lück, un cas français (1975)

Hermann B. Lück est un botaniste français d'origine allemande déjà aguerri lorsqu'il découvre les L-systèmes. Avec sa femme Jacqueline, depuis la fin des années 1950, il s'est en effet spécialisé dans l'étude de la multiplication cellulaire chez certaines algues vertes filamenteuses. Il travaille donc sur un objet biologique très proche de celui de Lindenmayer. Son but, à terme, est de pouvoir utiliser les connaissances acquises en ce domaine pour étudier ensuite les modes de formation des tissus organiques. Sa problématique part donc du principe que la connaissance de la morphogenèse des algues filamenteuses pourra aider à la compréhension de l'histogenèse.

Jusque dans les années 1940, toute recherche morphogénétique concernant les tissus reposait sur deux idées qu'il serait bon, selon Hermann Lück, de dépoussiérer : 1- les dimensions des cellules présenteraient des variations aléatoires qu'il faudrait formaliser comme telles et dont il ne faudrait considérer que la moyenne dans les arguments théoriques ; 2- les cellules particulières, de par la position spécifique dans le tissu, ne devraient être prises en compte que de manière qualitative et non quantitative. Autrement dit, l'hétérogénéité comme les ruptures de continuité dans le comportement des cellules différenciées étaient auparavant soit rapportées à une loi statistique homogénéisante, soit à une distinction qualitative purement terminologique et irréductible à l'analyse quantitative. Dans les années 1960, le couple Lück s'inscrit au contraire dans cette nouvelle lignée de botanistes et de morphologistes d'après-guerre qui, comme Ralph O. Erickson, un des maîtres de Lindenmayer et dont celui-ci s'est alors déjà démarqué, ont mis l'accent sur la nécessité de suivre du mieux possible, c'est-à-dire quantitativement, le comportement individuel des cellules lors des phases de multiplication et de différenciation : ils partent du principe qu'il faut davantage insister sur la certaine autonomie qu'ont les cellules au cours de l'élongation des organes comme au cours de l'histogenèse[1] plutôt que d'inféoder le comportement individuel de la cellule uniquement à sa position par rapport au tout déjà constitué, ce qui serait laisser la porte ouverte à une certaine forme de finalisme auquel Lück ne veut pas céder[2]. Selon Lück, le comportement de la cellule serait déterminé par son ascendance plutôt que par son voisinage ou que par son appartenance à un tout :

« Nous sentons la nécessité de chercher une approche dans laquelle le comportement des cellules n'est pas considéré à la lumière de la croissance de l'organe, mais plutôt comme un

[1] [Lück, H. B., 1975], p. 24.
[2] Lück rappelle et fait sienne la critique voilée que le botaniste britannique J. Dormer avait formulé en 1972 à l'encontre du physiologiste Hejnowicz qui proposait dès 1959 de définir une variable continue dite de « densité de cellules » pour aborder les problèmes d'histogenèse : « une telle analyse représente une approche impressionnante de la finalité », "such an analysis represents an impressive approach to finality", [Lück, H., B., 1975], p. 24.

résultat des règles agissant indépendamment dans chaque cellule et qui accepte délibérément la possibilité d'un comportement différentiel des cellules filles. »[1]

Indiquons simplement ici que c'est dans ce genre de passage que l'on sent combien une telle approche algorithmique de la formalisation, conçue en fait par Lück comme une arme contre le finalisme en morphologie végétale, repose sur des hypothèses théoriques comparables à bien des égards à celle de l'individualisme méthodologique que l'on peut trouver en sociologie. Ici, les individus que sont les cellules portent en eux un ensemble de règles qui les déterminent à agir de manière autonome, essentiellement en fonction du temps qui passe et éventuellement en fonction du voisinage. Dans ces conditions, on comprend mieux ce que Lück pense pouvoir trouver dans le formalisme algorithmique de Lindenmayer dont nous avons déjà abondamment montré l'inspiration logiciste. Dans ce travail, on perçoit que la modélisation algorithmique, refusant de prendre en compte une hypothétique information venant du niveau supérieur (l'organe) et à destination du niveau inférieur (les cellules), mais laissant au contraire toute l'autonomie au niveau inférieur, prend nettement le parti d'une explication générative de la morphogenèse et centrée sur le comportement de la cellule. Le projet est donc bien celui d'une explication de la morphogenèse qui soit plutôt mécaniste que finaliste.

Cependant, en général, il faut plus que la présentation d'une solution formelle alternative et séduisante, car philosophiquement plus satisfaisante, pour inciter un chercheur à se convertir à une méthodologie radicalement nouvelle comme cela interviendra en effet chez Lück. Encore faut-il qu'une impasse se dessine dans l'approche antérieure qui exhorte le chercheur à franchir le pas et le pousse à faire cet investissement conceptuel. Or, c'est bien ce qui est également apparu au cours des recherches de Lück. En effet, de son côté, pendant plus de dix ans, et à l'aide des méthodes biométriques largement répandues en biologie, Lück a lui-même d'abord développé des méthodes classiques d'analyse statistique dans le but de contourner les deux interdits sus-cités et de mieux rendre compte, en les quantifiant, de certains scénarios de l'histogenèse. Mais il lui est progressivement apparu que les méthodes statistiques ne lui permettraient pas de produire des hypothèses quantifiables au sujet de l'évolution future des cellules prises une à une, ce qui était pourtant, selon lui, souhaitable. Cette impossibilité, à ses yeux, ne provenait pas du fait que les cellules étaient dépourvues de tout déterminisme précis mais plutôt du fait que l'approche statistique ne laissait pas apparaître ce déterminisme car elle ne permettait pas de prendre en compte formellement la *récursivité* des déterminismes individuels telle qu'elle se fait manifestement jour *via* le rapport de filiation entre cellule mère et cellule fille[2]. En 1974[3], lorsqu'il rencontre Lindenmayer à Mac Lean en Virginie, à l'occasion de la conférence sur la Théorie des Automates Biologiquement Motivés, Lück connaît déjà ses travaux et il est déjà convaincu qu'il lui faut opérer un revirement complet dans sa propre approche formelle. Selon lui, si l'on veut produire des hypothèses théoriques quantifiables et susceptibles d'être rapportées et comparées à des valeurs mesurées sur le terrain, l'approche analytique n'est plus de mise : il faut synthétiser. C'est-à-dire qu'il faut modéliser la morphogenèse selon certaines hypothèses comportementales élémentaires et identifier ensuite les paramètres de ces règles en fonction des résultats obtenus globalement :

---

[1] "We feel the necessity to look for an approach in which the behaviour of cells is not considered in the light of the organ-growth, but as a result of rules acting independently in each cell, thus deliberately accepting the possibility of a differential behaviour of daughter-cells", [Lück, H., B., 1975], p. 24.

[2] "classical statistical models proved to be unable to respond to structural recursive rules of morphogenetic processes", [Lück, H. B., 1975], p. 31.

[3] Son premier article sur le sujet remonte à sa participation à la conférence de 1974. Voir [Lindenmayer, A., 1975], p. 22.

« En d'autres termes, nous devons chercher un modèle qui soit capable de simuler le comportement cellulaire de manière telle qu'il nous fournisse toujours une bonne adaptation aux données observées à un niveau supérieur à celui de l'intégration des éléments [le niveau de l'organe. NDT], et qui permettrait des prédictions également à ce niveau élémentaire [le niveau cellulaire. NDT]. Un tel modèle devrait être basé sur des suppositions très simples de manière à être applicable de façon très générale. »[1]

C'est donc bien cette rencontre avec le travail de Lindenmayer qui va représenter comme un tournant dans la pratique scientifique des Lück. Or, auparavant, ils s'inscrivaient davantage dans le courant de modélisation statistique de la morphogenèse institué par l'école de botanique de l'Université de Pennsylvanie, essentiellement autour de Goddard et, surtout, de Erickson. Revenons un moment sur le travail de ce botaniste que nous avons déjà évoqué précédemment, cela afin de mieux faire comprendre pourquoi Lindenmayer arrive à convaincre certains morphogénéticiens, dont Lück, d'abandonner l'approche par la formalisation continuiste.

L'analyse numérique de la croissance : Ralph O. Erickson et l'ordinateur-calculateur

La figure d'Erickson est intéressante car elle est assez complexe et ne peut être aisément caricaturée. Elle permet en ce sens de faire d'autant plus ressortir le sens et la valeur des voies divergentes adoptées à la même époque, celles de Lindenmayer et des Lück notamment, d'où son importance pour notre propos. En effet, même si, dans son cas, on a affaire à un botaniste qui modélisait au moyen de formalismes différentiels assez classiques, il est important de noter que cela ne l'a aucunement empêché de recourir assez tôt à l'ordinateur. Il est vrai qu'Erickson donnait à cette machine un rôle épistémique bien différent de celui que lui attribue Rosen ou même Lindenmayer dans leurs propres travaux. Mais là est justement tout l'intérêt du rapprochement entre ces deux branches distinctes de la modélisation de la morphogenèse à la fin des années 1960 et au début des années 1970 : l'analyse numérique de la croissance d'un tissu organique d'un côté, approche née dans la botanique expérimentale instrumentée par des microscopes optiques performants, et la modélisation logiciste de la genèse d'une arborescence, approche née plutôt dans un contexte de biologie théorique mais soutenue assez rapidement, comme nous l'avons vu, par des expérimentations ponctuelles.

Dans les années 1950, Erickson s'intéressait en effet particulièrement à la croissance des tissus organiques, notamment en poids et en surface, comme dans le cas des feuilles. En ce sens, il ne se penchait pas prioritairement sur les phénomènes d'arborescences, au contraire de ses collègues qui, comme Lindenmayer, travailleront sur les algues ou, plus généralement, sur les organismes filamenteux. Il s'orienta donc plutôt vers les phénomènes anisotropes de croissance en dimension, comme ceux que d'Arcy Thompson avait signalés lorsqu'il expliquait qualitativement la forme des feuilles par des différentiels de vitesses de croissance locale[2]. Or, dans ces années-là, et pour ces phénomènes particuliers de croissance en surface ou en volume, l'approche globale par les lois allométriques de Huxley et Teissier commençait en effet à présenter des signes de

[1] "In other words, we have to look for a model which is capable of simulating cellular behaviour in such a way that good fitting of observed data will still be provided on a level higher that the elemental integration level, and which would enable predictions on the elemental level also. Such a model should be based on very simple assumptions, in order to be applicable in a very general way", [Lück, H., B., 1975], p. 24.
[2] Voir *supra*.

faiblesse, ainsi que le rappellera Lück en 1975 : d'une part, la précision du suivi que permet un tel formalisme est insuffisante, notamment au vu des progrès de la microscopie optique au cours des années 1930, et, d'autre part, même s'il s'agit là d'une formalisation à prétention descriptive, sa légitimation purement physiologique à l'exclusion des phénomènes biochimiques ou mécaniques en première approximation, risque de nous orienter tout de même vers une explication de type finaliste.

En fait, en 1943, une méthode descriptive mais analytique et mécaniste, donc alternative en ce sens, vit le jour et proposa une modélisation mathématique des comportements individuels différenciés des cellules. C'est un biochimiste américain, spécialiste de la croissances des levures mais aussi, et cela n'est pas indifférent, de la microscopie optique, Oscar White Richards (1902-1988) de l'Université de Yale, ainsi que son collègue botaniste, A. J. Kavanagh, qui reprirent méthodiquement et amplifièrent conceptuellement la proposition de d'Arcy Thompson en montrant son caractère effectivement opérationnel dans un cadre de botanique expérimentale et de terrain. Ils appliquèrent la théorie hypothétique, mais analytique du point de vue formel, des vitesses différenciées à la croissance d'une feuille de tabac et en tirèrent une méthode d'analyse spatiale des structures en croissance. Elle consistait, comme le rappella Ralph O. Erickson en 1966, à évaluer la divergence de la vitesse de croissance des tissus par une méthode formelle de type analyse vectorielle[1]. Rappelons que le formalisme de la divergence (noté ***div***) leur venait alors des expressions des lois de l'électromagnétisme mises en forme par le physicien Maxwell à la fin du dix-neuvième siècle. Mais il était aussi utilisé en mécanique des fluides. Et c'est cette analogie mécanique que les auteurs privilégièrent. La divergence est définie de la façon suivante, en fonction des deux composantes axiales v_x et v_y de la vitesse de croissance locale **V** :

$$\boldsymbol{div}\ \mathbf{V} = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y}$$

En deux dimensions, la divergence du vecteur vitesse est donc la somme des dérivées partielles spatiales de ce vecteur selon les deux axes de coordonnées. En 1943, Richards et Kavanagh utilisaient directement ce formalisme différentiel de la divergence pour exprimer un « taux spécifique de croissance » en volume ou en surface par unité de volume ou par unité de surface[2]. Comme le souligna Erickson, ce transfert de formalisme imposait obligatoirement de concevoir en même temps la croissance des tissus organiques sur le modèle des flux de fluides compressibles ou incompressibles[3]. L'analogie physique devait donc être assumée en tant que telle. Lorsqu'Erickson se décida à travailler sur cette proposition, le formalisme de Richards et Kavanagh l'avait depuis longtemps séduit (dès 1955[4]) puisqu'il allait dès le début dans le sens même de sa propre approche de la morphogenèse : il permettait, au moins en droit, de prendre en compte la diversité des taux de croissance locale dans les organes et plus seulement la moyenne de ces taux comme dans l'approche statistique ou allométrique classique. Ainsi qu'il le précisa lui-même, comme dans le cas des champs de vecteurs en électromagnétisme ou en mécanique des fluides, quand la divergence de la croissance organique est positive, on a affaire à une « source »

[1] [Erickson, R. O., 1966], p. 390.
[2] [Erickson, R. O., 1966], p. 390.
[3] Sur cette supposition explicite, voir [Erickson, R. O., 1979], p. 481.
[4] Erickson publie en 1956 son article sur la croissance des racines du maïs et sa référence y est bien déjà l'approche descriptive, analytique et mécaniciste de Richards et Kavanagh. Voir sur ce point [Levin, S., 1991], chapitre 3, p. 1. On peut dire que cette formalisation est à prétention d'abord descriptive parce qu'elle se concentre sur les vitesses de croissance et leur répartition dans l'organe mais non sur les phénomènes qui sont à l'origine de ces vitesses.

de croissance (« *source* »), quand elle est négative, on a affaire à un « puits » ou un « trou » (« *sink* ») de croissance[1]. Or, cette modélisation analytique est restée pendant vingt ans peu développée, si ce n'est même quasiment lettre morte, parce qu'elle nécessitait la mise en œuvre de calculs très nombreux, laborieux et donc rédhibitoires[2]. Elle consistait en effet à tâcher de trouver des équations analytiques pour les composantes de la vitesse susceptibles de faire correspondre les divergences locales calculées avec les divergences locales effectivement mesurées au cours d'une expérimentation minutieuse. Ici, il faut comprendre que, malgré son caractère exigeant, ce n'est pas tant l'expérimentation qui avait d'abord freiné les botanistes comme Erickson : il est toujours possible de mettre en œuvre un dispositif expérimental de marquage régulier de points de contrôle sur une feuille en croissance que l'on met régulièrement en correspondance avec une feuille de papier calque. C'est d'ailleurs ce qu'ont fait Richards et Kavanagh dès 1943. La difficulté principale résidait plutôt dans l'*exploitation de ces données* pour les calculs d'ajustement. Les composantes du vecteur vitesse étant exprimées analytiquement et en première approximation par des polynômes, il fallait pouvoir ensuite *faire les calculs* d'ajustement statistique de ces formes polynomiales aux données de l'expérience. Or, ces méthodes calculatoires d'ajustement systématique existaient et elles avaient été publiées à partir des années 1920, à la suite des travaux des statisticiens R. A. Fisher puis M. G. Kendall. Mais c'est justement elles qui nécessitaient un nombre de calculs prohibitif. C'est donc elles qui devaient bénéficier en priorité d'une automatisation des calculs.

Précisément, en 1965, Erickson considéra que le paysage technique avait changé à ce niveau là. Des ordinateurs aisément programmables par des biologistes étaient à disposition. Il se lança donc à son tour dans le développement de cette méthode d'analyse suggérée il y a plus de vingt ans essentiellement parce qu'il disposait désormais des nouveaux moyens de calcul automatique du Département de Biologie de l'Université de Pennsylvanie : d'abord un UNIVAC I puis un IBM 7040 (d'une mémoire de 32 Ko) qu'il programmait en FORTRAN[3]. En 1966, cette approche différentielle put donc enfin se développer du fait que le blocage technique initial s'estompait.

La méthode de Richards et Kavanagh faisait alors chez lui l'objet d'une application à la croissance d'une feuille de *Xanthium*. Ce travail fut publié en 1966 dans le *Journal of Experimental Botany*. Le programme informatique y servait d'abord et avant tout à ajuster numériquement le modèle analytique aux données mesurés. Mais, plus accessoirement, et dans cette même étude de 1965-1966, Erickson se servait aussi de l'ordinateur pour faire représenter la feuille de *Xanthium* sur une imprimante en y faisant figurer par des chiffres différents les différentes zones où la divergence atteignait des valeurs à peu près semblables, c'est-à-dire où le taux de croissance était à peu près le même. Il obtenait alors le dessin très grossier d'une feuille sur lequel les divergences mesurées ou calculées apparaissaient dans leurs localisations relatives.

On voit donc que dans ce travail Erickson avait recours à l'ordinateur surtout au titre d'un calculateur numérique et non pas au titre d'un opérateur logique ni non plus d'un simulateur même si la représentation finale de la feuille tendait à s'en rapprocher néanmoins. C'est parce qu'il favorisait avant tout le choix du formalisme, et, en particulier, celui du formalisme différentiel. Dans les années 1970, Erickson continua dans cette voie-là en complexifiant ses emprunts au formalisme de la mécanique des fluides[4]. Il reconnut même la valeur du travail de Lindenmayer,

[1] [Erickson, R. O., 1966], p. 390.
[2] "forbiddingly laborious", [Erickson, R. O., 1966], p. 390.
[3] [Erickson, R. O., 1966], p. 391.
[4] Voir [Erickson, R. O., 1976] et [Silk, W. K. et Erickson, R. O., 1979].

mais sa préférence pour les équations différentielles et les approximations polynomiales de leurs solutions resta inattaquable chez lui. Pour quelles raisons ?

Rétrospectivement, Erickson justifia par cinq arguments explicites son choix initial pour le formalisme différentiel et donc pour l'usage de l'ordinateur au titre de simple calculateur numérique:

1) Tout d'abord, l'objet biologique qui le préoccupait (les tailles, les surfaces et les volumes, bref les dimensions), à la différence des arborescences, appelait un formalisme adapté à la *mesure*. Il devait donc rester métrique voire géométrique[1].
2) Pour que le modèle puisse communiquer avec les mesures et s'ajuster sur les données, il fallait que les variables du modèle mathématique soient directement et objectivement mesurables : plus que d'autres formalismes, les formules analytiques (les polynômes par exemple) autorisaient le modèle à être de plain-pied avec ce qui est intrinsèquement mesurable sur le terrain. Le modèle était par-là plus commodément et plus précisément ajustable.
3) Il ajoutait : « La puissance des équations différentielles a été abondamment prouvée dans les sciences physiques et les ressources des mathématiques classiques sont disponibles pour les caractériser et les résoudre »[2]. Autrement dit, c'était un formalisme que l'on connaissait déjà bien et dans lequel on pouvait se poser des problèmes que l'on savait déjà techniquement résoudre par le calcul. Pour Erickson, en biologie quantitative, il fallait utiliser ce qui marche. On avait recours à ce moyen formel puisqu'il était déjà manipulable et il ne nous demandait pas d'effort dans ce sens-là. Le biologiste n'avait plus qu'à appliquer des recettes mathématiques déjà éprouvées dans d'autres domaines (la physique essentiellement).
4) En particulier, le développement relativement récent des méthodes d'analyse statistique (ayant notamment recours aux polynômes orthogonaux qui avaient été tabulés et publiés[3]) permettait de généraliser la méthode des moindres carrés ou des moindres rectangles et de mener jusqu'au bout le calcul des paramètres des polynômes ajustés. La calculabilité assurée des procédures d'ajustement du modèle descriptif aux mesures était donc un argument de poids également.
5) Enfin, le formalisme différentiel permettait, si l'on adopte une « bonne résolution spatiale et temporelle »[4] pour les données, de fonder la formalisation sur quelque chose qui, au niveau élémentaire, avait un sens biologique acceptable : or, c'est ce que Erickson appelait, depuis 1956, le « taux élémentaire de croissance relative en surface » (« *relative elemental rate of increase in area* »[5]).

Or, précisément, c'est ce dernier argument qui semble tout de même un peu circulaire aux yeux de chercheurs comme Lindenmayer ou Lück : Erickson n'a-t-il pas construit ici un concept biologique *ad hoc* ? C'est-à-dire n'a-t-il pas fabriqué de toutes pièces ce concept biologique de « taux de croissance par unité de surface » pour le faire s'adapter au formalisme différentiel qu'il

[1] [Erickson, R. O., 1976], p. 407.
[2] "…the power of differential equations has been abundantly proven in the physical sciences, and the resources of classical mathematics are available for characterizing and solving them", [Erickson, R. O., 1979], p. 408.
[3] Voir [Erickson, R. O., 1966], p. 392.
[4] "To have meaning in a differential equation, data must here be obtained with good spatial resolution as well as good resolution in time", [Erickson, R. O., 1979], p. 408. Ce qu'Erickson ne précise pas davantage.
[5] [Erickson, R. O., 1966], p. 391.

préférait de toute façon pour les raisons 1, 2, 3 et 4 ? Ainsi il avait beau jeu de donner ensuite l'impression de découvrir *a posteriori* la parfaite adaptation de ce concept aux variables métriques introduites par le formalisme différentiel…

C'est justement la fragilité de ce genre de choix dont les Lück prennent vivement conscience en ce début des années 1970. Cela n'empêchera pas bien sûr Erickson de faire école par la suite, de son côté, et de continuer à développer son approche fondée sur l'analogie des champs de vecteurs en physique[1].

Le tournant logiciste

Pour les raisons que nous avons dites (décision de donner la primauté au comportement individuel de la cellule, caractère arbitraire de toutes les approches quantifiées et mathématiques des niveaux supérieurs à celui de la cellule), à partir de cette année 1974, les Lück vont donc pour leur part développer une utilisation systématique de certaines catégories de langages de Lindenmayer, les PDOL (*Propagative Deterministic Context-free Language*)[2], c'est-à-dire des langages formels déterministes qui ne font intervenir aucune circulation d'information entre cellules voisines[3], en conformité avec leur choix théorique initial d'une générativité mécaniste, non-finalisée et non gérée au niveau supérieur de l'organe. Ils vont ainsi appliquer les PDOL à la modélisation formelle de la morphogenèse des algues vertes filamenteuses (le *Chaetomorpha linum*).

L'article de 1975 du *Journal of Theoretical Biology* montrera la puissance de cette approche en ce qu'elle permet bien en effet de distinguer, en fonction de leur état logique interne respectif, les différentes classes de cellules observées au cours de la morphogenèse. Conformément à leur attente, le formalisme de Lindenmayer leur permet de quantifier *a priori* les probabilités de ces différentes classes : ils appliquent pour ce faire les théorèmes simples formellement déductibles des seuls axiomes du PDOL. Et le modèle est validé selon eux du fait que les distributions statistiques réellement mesurées sur les algues correspondent aux probabilités calculées *a priori* par le modèle algorithmique[4]. Hermann Lück se livre même à un test statistique pour montrer le caractère significatif de l'estimation des paramètres des règles du PDOL choisi. Dans ce cadre-là, l'analyse statistique est certes bien réemployée, mais d'une façon très limitée et seulement en aval du processus de modélisation algorithmique. Le modèle récursif et génératif y a donc bien détrôné à la fois l'analyse statistique et le modèle biophysique et analytique.

Par la suite, en conformité avec leur projet initial d'étendre leur recherche à l'histogenèse, les Lück vont développer des formalismes logicistes apparentés au premier qu'ils employèrent en tâchant d'adapter l'approche algorithmique de Lindenmayer à la définition de règles régissant la genèse et la structuration d'éléments bidimensionnels dans les tissus végétaux, c'est-à-dire d'éléments de surface et non seulement d'éléments linéaires comme c'était en revanche encore le cas pour les L-systèmes appliqués aux corps filamenteux (les algues). Ils appelleront ces

[1] L'école de Goddard et Erickson est encore prospère actuellement. Elle procède à l'étude quantifiée des croissances des racines de certaines plantes, par exemple, au moyen de concepts comme le « taux de croissance », la « structure de taux de croissance » (notion introduite par l'élève et collaborateur d'Erickson, Wendy Silk de l'Université de Californie, en 1989, voir [Levin, S., 1991], chapitre 3, p. 1), le « taux d'élongation » ou le « nombre de cellules en état de division ». Voir, pour ces dernières notions, [Beemster, G. T. et Baskin, T. I., 1998]. La prise en compte du comportement individuel des cellules y est donc encore assez largement contournée.

[2] Le 'O' (« *zero* ») de PDOL qui veut dire « indépendant du contexte » vient en fait du zéro de l'expression anglaise « *zero-sided* » c'est-à-dire encore « langage où l'état de la cellule n'est déterminé par aucun de ses côtés ou de ses voisines ».

[3] Voir [Lindenmayer, A., 1975], pp. 9-11.

[4] [Lück, H., B., 1975], p. 28.

formalismes à interprétations géométriques spatialisées des « systèmes cartographiques » ou « *map-systems* »[1]. Il est donc important pour nous de noter ici que les Lück ne considèrent pas qu'il fallait abandonner l'approche à la Erickson uniquement parce qu'ils s'attaquaient, comme Lindenmayer, à un objet biologique différent d'un point de vue de la morphogenèse (les algues alors qu'Erickson s'occupait de feuilles) ; mais, plus largement, et c'est là que l'on peut déceler leur propre option épistémologique, anti-finaliste et somme toute assez contingente d'un point de vue strictement technique, ils considèrent que ce choix qui s'était avéré en effet pertinent pour les algues *doit* par la suite et par principe l'être aussi pour les tissus. En étendant à l'étude de la morphogenèse des tissus la préférence formelle qu'ils ont pour les modèle d'algues, les Lück sont appelés à inventer des axiomatiques de langages formels spatialisés et à demeurer dans cette approche logiciste de la morphogenèse qui est actuellement encore la leur (en 2000).

Qu'il nous suffise d'avoir indiqué le lieu précis où se décèle chez eux un choix méthodologique relativement contingent, comme auparavant nous l'avions décelé chez Erickson. Nous ne suivrons pas en effet davantage la série de leurs travaux dès lors qu'ils ne rencontreront plus que très incidemment les critères de notre enquête historique. En effet, jusqu'au milieu des années 1980 par exemple, à aucun moment les Lück ne recourront à une représentation assistée par ordinateur. Leurs publications présenteront seulement des dessins effectués à la main et dont les parties (les parois des cellules par exemple) seront codées numériquement de manière à pouvoir y appliquer les règles d'un système formel spatialisé assez complexe. Malgré tout, et assez logiquement (comme le fit d'ailleurs Lindenmayer dès 1971), ils ne cesseront pas de se rapprocher des travaux théoriques en informatique graphique puisque leurs formalismes seront étroitement assimilables à des approches axiomatiques de type grammaires de graphes à deux et trois dimensions. Pendant les années 1980 et 1990, ils publieront ainsi un grand nombre d'articles dans des congrès d'informatique graphique. Leurs contributions toucheront donc essentiellement ces deux domaines : la biologie théorique de la morphogenèse et l'informatique graphique théorique. Ce sera une autre occasion de convergence entre biologie du développement et informatique, mais à un niveau purement théorique.

À travers ce cas d'un déplacement épistémologique de la biométrie vers la modélisation logiciste, nous voyons bien que l'usage qui est fait de l'ordinateur reste plutôt d'ordre axiomatique, déductif et donc théorique du point de vue de la biologie. Dans de tels travaux de modélisation algorithmique, la simulation réaliste est certes souvent invoquée, mais seulement à titre d'argument théorique et logique. Elle n'est que très rarement menée concrètement et jusqu'au bout. C'est plus la *possibilité* de simuler les logiques de la plante ou le « langage » de la plante, que la *simulation elle-même* qui est mise en valeur. Les modèles sont d'ailleurs validés, soit en amont de toute simulation, comme chez Lindenmayer, soit en marge de la simulation proprement dite, comme chez les Lück. Pour ces derniers, en effet, la compréhension théorique et biologique étant l'objectif principal, à la différence également de l'approche analytique et encore trop descriptive d'Erickson, la modélisation algorithmique (susceptible de donner lieu à une simulation) est intéressante *en elle-même* en ce qu'elle permet d'exprimer directement sous forme de théorèmes, c'est-à-dire sous forme abrégée, un certain nombre de résultats *a priori*, calculables à la main, et contrôlables par l'expérience, sans passer par la simulation du modèle sur l'ordinateur. Au départ, la modélisation algorithmique s'y présente donc surtout comme une nouvelle manière formelle d'exprimer une théorie et de procéder à la déduction de ses prédictions.

[1] [Lück, J. et Lück, H. B., 1982], p. 386.

Or, à la même époque, il est un autre usage de l'ordinateur et des possibilités de simulation qu'il permet, qui manifeste au contraire un certain souci de représentation fidèle du réel, en l'occurrence des arbres. Dans ce type de formalisation et d'utilisation de l'ordinateur, on prend la peine de mener la simulation jusqu'à l'intuition visible, jusqu'à la construction effective d'une image de synthèse ou d'une figuration de l'objet étudié sur un écran ou un traceur de courbes. Or, la structure d'un arbre paraît plus complexe que celle d'une algue. Dans ce cas, ce n'est pas une sensibilité aux seuls arrangements mutuels des organes qui peut suffire. Comme les rameaux changent de taille et d'orientation en fonction de leur ordre de ramification, il apparaît nécessaire de prendre en compte les dimensions des organes, c'est-à-dire leur dimensions géométriques. Quelles sont donc les sources et les motivations biologiques et épistémologiques de cette autre conception, géométrique plus que logique, de la simulation ? En quoi se distingue-t-elle de la modélisation algorithmique ? Et quelles sont les rapports qu'elles entretiennent toutes deux ?

CHAPITRE 20 - La simulation géométrique à vocation botanique : Honda et Fisher (1971-1977)

Nous l'avons vu, en ce début des années 1970, la modélisation d'origine logiciste que Lindenmayer bâtit sur les ruines de l'approche de Woodger, innove incontestablement. Mais en même temps, elle résiste à un certain versant pragmatique de la modélisation de la morphogenèse, car elle oblige à faire entrer les formes de la plante dans le carcan d'un formalisme *a priori*, certes plus souple, mais loin d'être encore assez souple pour les formes ramifiées supérieures. C'est là le signe de son penchant théorique irrésistible. Les convergences qu'elle autorise sont donc surtout orientées vers les destins intrinsèques des formalismes. Loin de plier complètement les formalismes vers la réalité biologique de la morphogenèse, c'est bien plutôt la biologie qu'elle fait plier vers les problèmes informatiques. Comme dans le cas similaire de l'importation des algorithmes génétiques en informatique, la biologie sert ici de modèle pour des formalismes de computation sans qu'il y ait de retombées immédiates pour la biologie[1]. Certes, cette convergence solidifie et pérennise ce nouveau domaine d'études formelles. Mais la biologie s'y serait lentement asphyxiée si quelque chose de nouveau n'y avait pas été par la suite insufflé. Une série d'événements et de rencontres vont bien plus tard ramener la modélisation et la simulation logicistes vers les êtres vivants. Mais entre-temps, une autre école de simulation, d'origine essentiellement japonaise, décida, quant à elle, de partir de l'arbre réel pour y revenir tout de suite.

Reconnaissance de formes d'arbres et écrans graphiques à l'Université de Kyoto

C'est un physicien de l'Université de Kyoto, du nom de Hisao Honda, qui, en 1970, se trouve reprendre explicitement la proposition de Cohen consistant à simuler graphiquement et par ordinateur la croissance pas à pas d'une forme arborescente. Auparavant, Honda avait souvent été impressionné par les grands arbres du parc de l'Université de Kyoto. Et, face à eux, il s'était demandé comment on pouvait reconnaître une espèce d'arbre au moyen d'une simple inspection visuelle du port de l'arbre. Or, du point de vue de sa problématique scientifique propre, la question biologique de la morphogenèse lui apparaît très vite comme parallèle à une question de reconnaissance de forme ; ce qui est sa spécialité première. C'est donc d'abord en tant que chercheur en reconnaissance de forme et dans le cadre d'un développement du matériel informatique particulièrement tourné vers les applications graphiques, qu'il se trouve intéressé par

[1] Ce n'est pas ici le lieu de rapporter l'histoire précise des algorithmes génétiques. Notons simplement que l'on doit leur naissance à l'informaticien américain John Henry Holland (né en 1929). À partir d'une réflexion sur les automates cellulaires, il proposa une « théorie » permettant de modéliser des systèmes adaptatifs, c'est-à-dire ces systèmes dont les règles sont non seulement distribuées mais peuvent aussi changer au cours du temps et des générations des cellules. Dès la fin des années 1950, dans la suite des travaux de von Neumann et de Burks, et après avoir travaillé à la conception de systèmes de « groupes d'ordinateurs », il proposa que l'on s'inspire des phénomènes d'évolution dans le monde organique pour concevoir une forme de modélisation évolutive. Voir [Holland, J. H., 1962] : les références à la génétique des populations y sont fondamentales. Après une longue période de développements spéculatifs et rhétoriques dans de nombreux secteurs (notamment dans les théories économiques de la rationalité limitée), il semble que la décennie 1990 ait vu poindre une série d'applications importantes. Voir [Holland, J. H., 2001]. Cette technique a rejoint celle de la modélisation par neurones formels pour constituer aujourd'hui les approches de programmation dites « sous-symboliques » où l'on assume le fait que le programme résolve un problème à un niveau infra-linguistique et donc sans que l'on puisse se l'expliquer de manière symbolique. Voir [Abunawass, A., M., 1992], p. 87.

la problématique de la détermination, par les gènes, de la genèse des formes vivantes et, en particulier, des formes arborescentes. Sa propre question initiale est en effet précisément la suivante : « Comment se fait-il que l'on puisse deviner l'espèce d'un arbre à partir de sa forme qui est très variable et qui ne peut être saisie facilement en des termes scientifiques ? »[1]

Il se trouve que Honda peut techniquement aborder cette question en physicien à Kyoto car, depuis 1969, étant en poste au Centre de Traitement de Données de l'Université, il dispose pour sa part d'un matériel informatique particulièrement performant pour l'époque : le FACOM 270-30 de Fujitsu. Or, cet ordinateur est doté d'un écran graphique de très bonne qualité : le FACOM 6231C de Fujitsu. Ce qui lui permet de représenter finement les arborescences calculées[2]. Honda est par ailleurs déjà sensibilisé à certaines problématiques biologiques car, après sa thèse de physique de 1965, il a suivi un cours doctoral de biologie moléculaire portant spécifiquement sur l'ARN de transfert et les enzymes associées[3].

La problématique initiale de Honda en l'espèce est celle d'une reconnaissance infra-linguistique : certains caractères visibles nous sont reconnaissables et nous servent à reconnaître les arbres alors même que nous ne sommes pas des spécialistes de la botanique et que nous n'avons pas de mots pour les désigner. C'est un problème de reconnaissance humaine ordinaire. Puisque l'on n'a pas de mots pour désigner ces caractères, il est difficile de construire par la seule introspection et donc *a priori* le processus mental mis en œuvre dans ce genre de reconnaissance. Comme cela est alors classique pour la reconnaissance de formes automatisées, Honda préconise que l'on se propose des « modèles »[4] d'arbres, constructifs, pas à pas, à réitération et à paramètres variables. Ces modèles seront sélectionnés par un processus d'essais et erreurs. Le meilleur de ces modèles génératifs pourra être un modèle du processus implicite (non verbal et non verbalisable donc ne référant pas à des catégories linguistiques) de reconnaissance de l'arbre par un homme normalement cultivé. Or, ce problème de reconnaissance de forme que se propose de résoudre Honda dans son département de physique est, selon lui, tout à fait parallèle à cette question précise de morphogenèse biologique : « Quelle information sur la forme le gène contient-il et à travers quel processus son information est-elle représentée comme une forme ? »[5] C'est en lisant Cohen qu'il se convainc de l'existence d'un tel parallélisme.

Or, voici en quels termes il légitime la bi-disciplinarité de son étude sur ordinateur : selon Honda, ces deux questions peuvent être « sublimées »[6] en une seule, celle qui fait l'objet de l'article de 1971. Cette question précise est la suivante : « Comment décrire la forme économiquement ou comment extraire l'essence d'une information disparate au sujet de la forme ? »[7] Remarquons ici que Honda adopte une approche similaire à celle de Cohen car, des premiers travaux de simulation sur ordinateur de forme arborescente (dont ceux de Ulam[8]), il retient finalement la même idée que lui : des règles de génération simples peuvent donner

[1] "How is it that one can guess the species of the tree from its multifarious form, which can not be grasped easily in scientific words ?", [Honda, H., 1971], p. 331.
[2] [Honda, H., 1971], p. 335. L'article de 1971 publie des photographies noir et blanc très nettes de cet écran graphique.
[3] Communication personnelle de l'auteur dans un courrier électronique du 7 novembre 2003.
[4] [Honda, H., 1971], p. 332.
[5] "What information about the form does the gene store in it and through what process is its information represented as the form ?", [Honda, H., 1971], pp. 331-332.
[6] "The two interesting problems of the form, how to recognize and how to develop the form, might be sublimated to the more general problem, 'description of the form' …", [Honda, H., 1971], p. 332.
[7] "How to describe economically the form or how to pull out the essence from miscellaneous information about the form ?", [Honda, H., 1971], p. 332.
[8] Selon l'échange de courrier électronique que nous avons eu avec Hisao Honda le 7 novembre 2003, au moment où il soumet son article au *Journal of Theoretical Biology*, Honda n'a connaissance que du travail de Cohen paru dans *Nature* en 1967, mais il ne connaît pas directement ceux de Ulam ou Eden. Ce sont en fait les rapporteurs de son article qui lui signalent ces autres travaux de simulation de la forme.

naissance à des formes globales compliquées et très variables en fonction des paramètres des règles. En 1967, Cohen en tirait un argument théorique sur la plausibilité d'une masse relativement faible d'information dans les gènes déterminant la forme. En 1971, Honda veut donc aussi montrer que l'on peut donner naissance, sur ordinateur, à l'image d'un « corps semblable à un arbre » (« *tree-like body* ») au moyen de l'interaction entre règles élémentaires simples : pour son modèle d'arborescence, il ne choisit pas un modèle très détaillé et complexe (sinon la praticabilité mentale d'un tel modèle pour la reconnaissance de forme serait douteuse comme la praticabilité biochimique le serait également pour le stockage informationnel dans le génotype). Au contraire, il choisit d'avoir seulement accès à l'angle de branchaison et au rapport de réduction de la longueur de chaque rameau après bifurcation. Mais, à la différence de Cohen, il représente des arbres en trois dimensions et non seulement des structures arborescentes plates. Simplement le programme informatique en FORTRAN (langage qu'il apprend pour l'occasion) travaillera à projeter chaque état de l'arbre sur l'écran selon des règles de projection simples. La simulation de Honda est donc clairement fondée sur une formalisation géométrique puisqu'elle est orientée vers la production d'une figure réaliste sur un écran graphique. De plus, pour la branchaison et la croissance du rameau, contrairement à Cohen, Honda néglige les influences du voisinage. Moyennant ces hypothèses volontairement grossières car rendant les règles élémentaires simples, l'ordinateur paraît le meilleur outil non seulement pour traiter ces calculs simples et réitérés, mais aussi et surtout pour en représenter visuellement le résultat. Ce faisant, Honda produit un travail nettement interdisciplinaire puisqu'il s'appuie sur une analogie entre le gène (avec sa propriété de minimalité informationnelle) et le modèle mental minimal de reconnaissance d'une forme arborescente[1].

Un modèle de simulation génératif et géométrique validé par l'image

Il est une chose qu'il faut souligner. La visualisation réaliste des arbres simulés est facilitée par le fait que Honda, comme Cohen, met en œuvre directement un formalisme géométrique et non un formalisme par automates ou par grammaires à réécritures comme Lindenmayer ou Lück. Or, dans un langage évolué du type de FORTRAN, la gestion des points ou des traits lumineux sur l'écran de l'ordinateur se fait en référence à un repère métrique orthonormé. Techniquement, dans le programme, il n'y a donc pas à traduire l'expression mathématique du modèle pour en obtenir une représentation visuelle. Il suffit simplement à Honda de traiter le problème du passage du modèle métrique à trois dimensions à une représentation en deux dimensions pour que l'on puisse la visualiser sur un écran. Là encore, quelques notions de géométrie projective suffisent. Au contraire de Lindenmayer et comme Cohen, Honda n'insiste donc pas tant sur la topologie que sur la métrique de ces « corps semblables à des arbres » qu'il fait simuler par l'ordinateur. Il se range donc de fait dans une tradition de simulation plutôt métrique voire géométrique que logiciste. C'est la raison pour laquelle on peut qualifier sa simulation de préférentiellement géométrique.

Comme nous l'avons dit, la sélection des modèles les plus vraisemblables se fait chez lui par un processus itératif d'essais et erreurs. Ici l'essai consiste en la confrontation entre l'image visuelle, la figure donnée au final par l'écran graphique de l'ordinateur (à la fin du calcul de trois ou quatre ordres de ramification à partir du tronc vertical initial) et la capacité de reconnaissance de notre œil et de notre cerveau humains : pour Honda, si nous reconnaissons assez grossièrement sur l'écran une forme crédible d'espèce d'arbre réellement existante (ginkobiloba, érable, bouleau,

[1] "I would like to believe that the effort to seek simpler, more economical, and basic assumptions to describe the form of a tree would supply a clue to the truth of the nature of which we have hints in the field of pattern-recognition and morphogenesis", [Honda, H., 1971], p. 337.

azalée,…)[1], alors les paramètres du modèle génératif, entrés dans l'ordinateur un peu au hasard au départ, sont conservés ou affinés par d'autres essais, sinon leurs valeurs numériques sont rejetées. Afin de disposer d'une faculté de reconnaissance tout de même plus sûre et plus informée, Honda se fait aider par le morphométricien S. Oohata[2] du Département de Foresterie de la Faculté d'Agriculture de l'Université de Kyoto. Dans les premiers temps, Honda travaille donc en collaboration avec lui de manière à mieux appréhender ce que permettent de distinguer les paramètres géométriques qu'il intègre sans souci de réalisme biologique ou génétique au départ.

Dans cette approche, même s'il conserve un souci de la minimisation de la quantité d'information à donner initialement au modèle génératif, comme c'est le cas dans les modèles logicistes et axiomatisés de Lindenmayer, on sent que Honda est davantage porté à donner du crédit à la validation du modèle par la visualisation intuitive permise par le formalisme géométrique et par son traitement à l'ordinateur. Tout le programme de Honda est conçu autour de cette visualisation. Car c'est là que se concentre la discrimination entre modèles plus ou moins réalistes. Ce qui n'est pas le cas chez Lindenmayer où la crédibilité du modèle topologique est, à en croire son auteur, assurée au niveau plus local des filiations logiques entre cellules. La visualisation sur ordinateur est donc secondaire dans le travail de Lindenmayer alors qu'elle est essentielle pour Honda. La simulation géométrique est davantage conçue pour permettre une validation intuitive ou qualitative en aval, c'est-à-dire sur une image, une réplication du réel, alors que la simulation logiciste repose plutôt sur une validation conceptuelle et en amont des calculs de la simulation. Or, comme on peut s'y attendre, la simulation géométrique se développe surtout à partir du moment où les écrans graphiques font leur apparition et se développent, comme c'est justement le cas au Japon, en ce début des années 1970.

Une simulation de la géométrie des tissus

Après 1971, Honda quitte un moment la simulation des arborescences et s'oriente vers la simulation de la dynamique des diverses structures géométriques de colonies d'un certain type de zoospore ou algue verte (les *Pediastrum biwae*)[3]. Depuis les années 1920, les biologistes ont en effet reconnu que ces colonies de spores passent par différents types de distributions spatiales bien distinctes et assez aisément identifiables à l'aide d'observations au microscope optique. Honda fait d'abord simuler par l'ordinateur ces distributions spatiales au moyen de simples sphères (une sphère représentant grossièrement un zoospore) distribuées dans une sphère plus grande représentant elle-même une vésicule. Chaque zoospore est lancé dans une direction aléatoire, direction déterminée par le tirage d'un nombre pseudo-aléatoire calculé par la méthode de congruence de von Neumann, et va toucher ou bien la paroi de la vésicule ou bien un des zoospores déjà présents ; dès lors, certaines règles mécaniques simples, inférées à partir des nombreuses observations des biologistes et interprétées par Honda lui-même en des termes de géométrie analytique, sont appliquées mathématiquement par l'ordinateur de manière à lui faire déterminer le lieu d'arrêt de ce nouveau zoospore dans la vésicule : le programme simule ainsi une mécanique de mise en place progressive de la structure d'une colonie. Cette simulation permet de retrouver sur une image, c'est-à-dire en fait sur un tracé effectué au traceur de courbe

[1] [Honda, H., 1971], p. 335.
[2] En 1971, les biologistes S. Oohata et T. Shidei publient un article sur la structure de branchaison des arbres. Ils y pratiquent une analyse statistique (biométrique) de la taille des branches en fonction de l'ordre de branchaison. Voir [Fisher, J. B., Honda, H., 1977], p. 377.
[3] Voir [Honda, H., 1973].

(un « *plotter X-Y* »), quoique très grossièrement et de façon schématique, les grands types de distribution spatiale de ces colonies de zoospores.

En 1977, fort de ces simulations de colonies de spores par des sphères en interaction, Honda se tourne vers la simulation des tissus organiques au moyen de modèles mathématiques de cellules polygonales : un polygone peut en effet être conçu comme la figure qui relie les points d'intersection entre différents cercles concourants. Honda en reste donc bien à son approche géométrique originelle mais il la complexifie en utilisant notamment la définition mathématique des domaines de Dirichlet appelés encore diagrammes de Voronoi[1]. Il emprunte l'idée d'employer ce formalisme géométrique au travail alors récent de Arthur L. Loeb (1923-2002)[2] sur les structures spatiales.

Rappelons ici brièvement que Loeb est au départ un spécialiste de chimie physique et des colloïdes. Il est professeur à Harvard. Au début des années 1950, il avait été un des premiers chercheurs autorisés à travailler sur le projet de l'ordinateur Whirlwind du MIT[3]. Il avait alors participé à la conception de la mémoire de ce calculateur numérique puis il avait travaillé aux applications de l'ordinateur à la science des surfaces et des colloïdes. Dans son ouvrage méthodologique et interdisciplinaire de 1976, *Space Structures : their Harmony and their Counterpoints*, Loeb avait par la suite mis en avant l'importance de disposer d'un langage « visuel » permettant de stocker, communiquer et restituer les structures spatiales dans leur diversité. Entre autres choses, il y avait mis à l'honneur l'approche par les domaines de Dirichlet et il avait, par exemple, suggéré que l'on s'en serve pour la formalisation des compartimentations existant dans les villes (comme les quartiers dont on peut dire en quelque sorte qu'ils sont centrés autour d'une école…)[4].

Or, dans le cas du problème biologique de Honda, lorsque les zoospores des algues vertes vus en deux dimensions sont agrégés les uns aux autres et qu'ils recouvrent totalement le plan pour former une structure convexe de forme assez circulaire (ce qui correspond à une étape bien précise du développement de la colonie), la simulation primitive par des sphères ou des cercles concourants perd en pertinence car les spores ne sont plus circulaires : la mécanique des pressions réciproques et des mouvements mutuels des cellules ne peut être correctement prise en compte par un tel formalisme. En revanche, si l'on définit le centre approximatif de chaque polygone (ou domaine de Dirichlet) ainsi que les forces auxquelles il est soumis, on peut montrer qu'il est possible de calculer de manière analytique les déplacements de ce centre approximatif

---

[1] Le polygone de Voronoï (du nom du mathématicien ukrainien Georgy F. Voronoï, 1868-1908) est défini pour un point particulier appartenant à un ensemble de points du plan euclidien : il s'agit de l'ensemble des points de cet ensemble qui sont plus près de ce point donné que de tout autre point de l'ensemble. La définition peut se généraliser à n dimensions : on appelle alors ces structures des « diagrammes de Voronoï ». Elles couvrent le plan ou l'espace et elles servent donc à positionner un ensemble de points les uns par rapport aux autres. Selon le site de l'INRIA, « les diagrammes de Voronoï sont des structures très utiles, rencontrées fréquemment, car elles permettent de représenter des relations de distance entre objets et des phénomènes de croissance », http://www-sop.inria.fr/prisme/fiches/Voronoi/. Avec eux, on peut en effet traiter certaines déformations de structures, comme l'indique [Honda, H., 1978], p. 523. Selon l'INRIA, ces questions touchent désormais à ce que l'on appelle la « géométrie algorithmique », *ibid*. Pour l'ébauche d'un historique de ce concept chez Descartes (1596-1650) puis chez le mathématicien français Gustave Lejeune-Dirichlet (1805-1859), voir le site de l'Université Laval au Québec : http://plante.scg.ulaval.ca/MNT/Voronoi.html.

[2] Arthur L. Loeb est né à Amsterdam en 1923. Il achève ses études de chimie physique par un PhD au MIT à la fin des années 1940. Dans les années 1970, aux côtés de R. Buckminster Fuller, il devient un des fers de lance de la toute nouvelle « discipline » interdisciplinaire qu'est la synergétique. Jusqu'en 2001, en plus des « Mathématiques visuelles », il enseigne ce qu'il appelle la « Design Science », c'est-à-dire une « science de la conception » interdisciplinaire procédant par représentations spatialisées et valant tant pour les projets de composition artistique et musicale (il poursuit par ailleurs une carrière de musicien et de compositeur) que pour des formalisations diverses en ingénierie : cristallographie, architecture, oncologie... Pour ces informations, nous nous sommes appuyé sur le site du MIT : http://www.ves.fas.harvard.edu/courses/studio/.

[3] Pour l'historique du Whirlwind, voir [Ramunni, G., 1989], pp. 96 *sqq.*

[4] Voir [Honda, H., 1978], p. 536.

ainsi que les déformations du polygone correspondant ; ainsi en est-il, de proche en proche, pour tous les autres polygones et, finalement, pour le tissu organique tout entier. En 1978 donc, en partie inspiré par le travail de Loeb, Honda devient le premier chercheur à utiliser le formalisme des domaines de Dirichlet en science des tissus organiques, c'est-à-dire en histologie.

La simulation géométrique reste un argument théorique

Ce dernier travail est publié dans le *Journal of Theoretical Biology*[1]. Cette approche ne peut guère être considérée que comme un appui pour des considérations d'ordre théorique : grâce à la simulation sur ordinateur, la mécanique des mouvements cellulaires internes aux tissus semble au mieux avoir trouvé un formalisme très adéquat[2]. La ressemblance entre la description dessinée par ordinateur au moyen du formalisme et les microphotographies obtenues au microscope optique sert en effet d'argument principal à Honda. Mais il ne se livre pas à un calibrage systématique ni chiffré au regard de ce qui pourrait être des données de l'expérience. Cela serait d'autant moins pertinent que les côtés des cellules réelles sont en fait rarement rectilignes, au contraire de ce qui se passe dans le polygone qui en est la représentation schématique. Il faut donc noter que, dans ce cas-là également, la représentation visuelle résultante sert de critère de validation à échelle globale et essentiellement pour le choix du formalisme comme pour celui des paramètres de simulation. Comme Cohen démontrait, avec sa simulation, *la possibilité* que des règles simples pour la morphogenèse soient codées dans les gènes, Honda démontre *la possibilité* de recourir au formalisme de Dirichlet si l'on veut évaluer ponctuellement et un peu plus précisément le comportement des tissus, mais il ne se livre pas, là non plus, à des chiffrages effectifs. Même s'il fait intervenir la visualisation, son travail reste donc essentiellement théorique puisqu'il s'agit d'une argumentation portant sur le choix des formalismes mais non sur leur calibration effective.

La rencontre avec les mesures : rapprocher la simulation des détails du réel

Il en est déjà autrement dans le travail qu'il produit, en parallèle de ces travaux sur les tissus, avec le botaniste américain Jack B. Fisher. C'est en effet également en cette même année 1977 que Honda va, par ailleurs, concrétiser sa collaboration avec la botanique descriptive. Il se trouve qu'au moment où Honda infléchit son travail vers la simulation géométrique de la mécanique des tissus, le jeune botaniste Jack B. Fisher, alors en poste au Jardin Tropical de Fairchild à Miami, travaille sur le développement de la ramification d'un arbre tropical particulier, le *Terminalia*. Or, Fisher, en tant que botaniste, opère sur le terrain. Et il dispose d'un très grand nombre de mesures sur des arbres réels. Prenant connaissance en 1975 du premier article de Honda dans ce domaine, il perçoit très vite la possibilité d'une collaboration fructueuse : pourquoi ne pas affiner encore la simulation architecturale théorique de Honda au point de la calibrer sur des mesures réelles ? Selon Fisher, il serait en effet très utile de disposer de la description précise de la couronne des arbres :

[1] Voir [Honda, H., 1978].

[2] "In the present report, Dirichlet domains have been shown to have the possibility to describe, within certain limits, cultured cells in a sheet, epithelial cells in surface or tissue, and so on […] Then, at every stage of pattern changes, we can quantitatively obtain several geometrical properties which may be interesting in studying histology and histogenesis with respect to individual cell behavior", [Honda, H., 1978], pp. 537-538.

« Les formes des couronnes des arbres sont souvent d'une importance pratique chez les arbres à bois, à fruits ou d'ornement, et elles constituent une base pour la stratégie adaptative des espèces. »[1]

En effet, selon la thèse alors récente du botaniste américain H. S. Horn, publiée dans son ouvrage *The adaptative geometry of trees* en 1971, la couronne des arbres constitue en grande partie le lieu où s'exprime l'adaptation des arbres, aussi bien quant à leur environnement qu'eu égard aux autres espèces d'arbres[2]. Travailler à calibrer une simulation sur des arbres réels permettraient donc à la botanique descriptive de proposer davantage d'outils de prédiction précis dans les domaines de la foresterie, de la sylviculture et de l'arboriculture :

« PRÉDICTION DE FORMES D'ARBRE UTILES – La forme générale d'un arbre a souvent une importance pratique pour le forestier ou l'horticulteur. Il serait important de comprendre quels sont les paramètres qui transmettent les changements désirés dans la forme. Ces paramètres pourraient être sélectionnés parmi les semis et les jeunes arbres, en supposant que les paramètres en question restent constants dans un individu pendant l'ontogénie. »[3]

Or, à cette époque, pour discriminer les différents plants selon leurs structures arborescentes, les botanistes disposent surtout de l'approche morphométrique et statistique qui, aux yeux de Jack B. Fisher, semble, précisément à ce moment-là, avoir atteint ses limites. Afin de comprendre la raison principale qui va décider ce botaniste à opter pour la simulation sur ordinateur et à collaborer avec Honda aux dépens de l'analyse statistique, alors majoritairement employée, il nous faut auparavant rappeler brièvement les limites effectivement atteintes, tant dans le domaine de la morphométrie que dans celui de la morphologie causale et physicaliste des arbres, en ce début des années 1970.

Les limites de la morphométrie et de l'approche thermodynamique des arbres

On se souvient qu'une des approches formalisées et à prétention transdisciplinaire de la croissance des formes ramifiées était née de certains travaux de Horton en géomorphologie fluviale. Or, au début des années 1970, il est un travail qui va à la fois confirmer en un sens mais aussi montrer nettement les limites irrémédiables de cette approche par la loi de Horton en morphologie végétale. C'est celui des biologistes et physiologistes du Département de Médecine du *Queen Elizabeth Medical Centre* de Birmingham, en Angleterre. Leopold avait testé cette loi sur un seul arbre botanique. En 1973, en reprenant la problématique de Leopold qui consistait à tester l'existence de « ratio de bifurcation » et du « ratio de longueur » (ici ce sera en fait le « ratio des diamètres » des branches) chez les arbres botaniques, Barker, Cumming et Horsfield montrent que la loi de Horton vaut aussi statistiquement pour le pommier et pour le bouleau[4]. Pour leur part,

[1] "The shapes of tree crowns are often of practical importance in timber, fruit, and ornamental trees, and are basic to the adaptive strategy of a species", [Fisher, J. B., Honda, H., 1977], p. 377. Cette idée aura ensuite beaucoup d'importance dans le développement conjoint d'une approche dite souvent « sociologique » du comportement des arbres en forêts. On y repèrera ainsi des dominants et des dominés.
[2] [Fisher, J. B., 1992], pp. s138 et s146.
[3] "PREDICTION OF USEFUL TREE SHAPES – The overall shape of a tree is often of practical importance to the forester or horticulturist. It would be important to understand which parameters impart the desired changes in form. These parameters could then be selected for in seedlings or saplings, assuming that the parameters in question remain constant in an individual during ontogeny", [Fisher, J. B., Honda, H., 1977], p. 381.
[4] [Barker, S. B., Cumming, G. et Horsfield, K., 1973], p. 33.

ils procèdent à partir de véritables données de terrain, exhaustives, et non à partir de données partiellement estimées comme le fit Leopold : c'est-à-dire qu'ils ont choisi deux arbres réels, un pommier et un bouleau, et ils ont compté, mesuré et ordonné (selon l'ordre de ramification) chacun des rameaux de ces deux arbres[1]. Bénéficiant par ailleurs de l'équipement d'un laboratoire de biomédecine, ils sont en fait parmi les premiers à utiliser un ordinateur pour traiter systématiquement ces données morphométriques en botanique, et cela parce qu'elles se trouvent être en très grand nombre (près de 1300 rameaux pour le bouleau choisi).

Ils conçoivent ainsi un programme qui fournit à l'écran, sous forme d'un tableau de chiffres, le nombre de branches, leur taille moyenne, leur diamètre moyen ainsi que le domaine de variation de chacune de ces mesures pour chaque ordre de ramification. Ils peuvent également présenter ces résultats sous forme d'histogrammes de manière à faire apparaître les distributions réelles des paramètres mesurés en fonction de chaque ordre de ramification. Le résultat est que, comme dans le travail de Leopold sur le sapin, la « loi de Horton » se trouve vérifiée sur les moyennes du pommier et du bouleau. Les auteurs comparent ensuite quantitativement les ratios qu'ils ont calculés avec ceux qui ont déjà été trouvés par d'autres auteurs dans différents domaines : les rivières, les artères pulmonaires, l'arbre bronchial, les bronchioles[2]…Ils confirment donc en ce sens la possibilité d'un transfert de la loi de Horton à la morphologie végétale.

Mais ce qui distingue leur étude de celle de Leopold, et cela parce que, grâce à leur utilisation de l'ordinateur comme machine de stockage et de traitement de données, ils ont tenu effectivement compte de l'intégralité d'une information mesurée sur le terrain dans sa variabilité essentielle, c'est la réflexion que leur suggèrent les histogrammes finalement obtenus. Ils constatent qu'il y a une variabilité très importante de certains de ces paramètres géométriques pour un ordre de ramification donné. C'est notamment le cas pour le pommier. Il y a une telle variabilité de taille, parfois, que les longueurs et les diamètres des branches ne sont pas caractéristiques d'un ordre : il peut donc y avoir une erreur d'un ordre de ramification si l'on ne mène pas les mesures jusqu'au bout et dans leur intégralité. Rétrospectivement, il apparaît ainsi que la méthode grossière de classement des branches de Horton et Strahler repose en fait sur l'idée implicite que l'on regroupe ce faisant des rameaux dont on pense *a priori* qu'ils ont les mêmes fonctions physiologiques[3] et que ce formalisme, procédant par ordre de ramification, a un sens biologique qui permet toujours de saisir correctement le fonctionnement de l'arbre sans en écraser les nuances. Ce qui n'est pas toujours le cas, semble-t-il, au vu des résultats empiriques obtenus sur le pommier. Les auteurs montrent que si, par erreur, on classe un certain nombre de branches dans un ordre qui n'est pas véritablement le leur, on arrive à des erreurs grossières dans l'évaluation des ratios de Horton.

Autrement dit, il s'avère que cette pratique d'échantillonnage par ordre de ramification, fondée sur un présupposé trop immédiatement et trop grossièrement fonctionnaliste, ne peut se passer d'un décompte intégral des branches : les estimations théoriques de Leopold ne sont donc plus de mise car les ratios de Horton semblent fluctuer énormément si on ne conserve pas l'intégralité de l'information métrique et numérique :

« *Nous n'avons connaissance d'aucune méthode d'échantillonnage de systèmes de ramification qui soit satisfaisante et qui permette de déterminer l'ordre ; et, jusqu'à ce qu'une telle*

[1] [Barker, S. B., Cumming, G. et Horsfield, K., 1973], p. 34.
[2] [Barker, S. B., Cumming, G. et Horsfield, K., 1973], p. 41.
[3] [Barker, S. B., Cumming, G. et Horsfield, K., 1973], p. 42.

technique ait été développée, nous suggérons qu'il est nécessaire de compter chacune des branches. »[1]

En morphologie végétale, on ne peut donc faire aucun usage théorique correct de la loi de Horton sans posséder l'intégralité de l'information mesurée sur le terrain. Pour disposer des ratios justes, il faut avoir conservé l'information métrique intégrale, celle qui permet justement de reconstituer l'arbre réel, dans sa structure spatiale, branche par branche. Donc l'objectif théorique originellement visé par ce type de formalisme, la réduction de l'information en vue d'un usage théorique, ne semble pas susceptible d'être atteint pour les arbres botaniques. En 1973, et c'est cela qui est essentiel, il apparaît que l'approche thermodynamique et statistique des arbres botaniques ne permet pas de réduire et de condenser correctement et sans dommage les données morphométriques, surtout à destination du biologiste et du botaniste. Dans ces années-là, notamment aux yeux du botaniste Jack B. Fisher, il devient ainsi manifeste que ces approches, qui passaient au départ pour des constructions théoriques analogiques, ne sont en fait qu'autant d'analyses statistiques partielles déguisées et qu'elles interdisent la résolution des problèmes de foresterie, d'arboriculture ou de biologie évolutionnaire parce que la juste quantification et la prédiction de la forme de la couronne y semblent impossibles.

La première simulation géométrique d'un arbre réel : le *Terminalia*

Si l'on veut pouvoir prendre en compte la géométrie de la couronne, si cruciale pour l'étude théorique de la stratégie adaptative de l'arbre sur le terrain comme pour son étude énergétique, Jack B. Fisher est donc fermement convaincu qu'il faut conserver la possibilité de reproduire *intégralement et géométriquement* la forme et les structures de cette couronne, sinon on obtient des valeurs globales faussées. Cela signifie qu'avec les techniques morphométriques, on ne peut pas résumer quantitativement et valablement, en tout cas pour le botaniste, les caractéristiques de la couronne.

Or, ce qui fascine Fisher dans les premières simulations d'arbres botaniques théoriques de Honda, c'est bien au contraire la formidable variabilité obtenue dans la structure de la couronne et qui découle de simples variations dans la valeur des deux paramètres géométriques choisis : l'angle de ramification et le ratio de longueur[2]. Le modèle mathématique n'a pas besoin d'être complexe pour que la complexité de la forme de la couronne soit respectée et simulable. Comme Honda dans le cadre de sa problématique initiale de reconnaissance de forme, Fisher recherche donc bien, de son côté, un moyen minimal de reproduire le dessin de la couronne sans trop perdre de sa complexité, car il cherche en fait des paramètres clés, liés directement au génome et déterminant la forme optimale de la couronne pour l'utilisation que l'arbre en fait dans sa captation de l'énergie solaire. Contrairement à ce qu'il aurait pu prévoir, ce n'est donc pas exactement un généticien qui répond à l'attente de Honda et qui franchit le pont jeté par lui en 1971 en direction de la biologie, mais c'est un biologiste qui travaille à une échelle déjà bien plus intégrée : l'échelle morphologique et développementale.

---

[1] "We are not aware of any satisfactory method for sampling branching systems for the purpose of determining order and suggest that until a technique is developed it is necessary to count every branch", [Barker, S. B., Cumming, G. et Horsfield, K., 1973], p. 43.

[2] En 1971, Honda, pour sa part, ne semble pas connaître les travaux sur la loi de Horton. Il méconnaît donc *a priori* la pertinence du choix qu'il fait. Cette année-là, il se trouve que Leopold publie également son article, indépendamment, et dans le même numéro du *Journal of Theoretical Biology*. La rédaction du journal les imprime à la suite l'un de l'autre : les lecteurs de l'un seront donc ensuite inévitablement les lecteurs de l'autre.

En, 1976, Fisher contacte donc Honda par courrier. Il lui envoie ses mesures sur le *Terminalia*. Honda est tout de suite très intéressé. Et il accepte la collaboration même si son travail principal s'est entre-temps centré sur la simulation géométrique des tissus organiques. Pendant près de deux ans, ils vont ainsi collaborer tous les deux, à distance et par courrier, mais sans jamais se rencontrer[1]. Dans un premier temps, Honda est obligé de complexifier quelque peu son modèle génératif et géométrique initial de manière à pouvoir employer directement les moyennes des mesures faites par Fisher sur le terrain. Fisher, pour sa part, pense qu'il leur faudrait commencer par le *Terminalia* parce que c'est un arbre dont la couronne présente des étages foliaires nettement différenciés, ce qui lui donne une structure en pagode assez simple[2] :

« *Une limitation majeure des études quantitatives en géométrie adaptative des arbres est la complexité tridimensionnelles des branches comme de l'orientation des feuilles ; ce qui a empêché la construction de modèles structurels raisonnables. Cependant, la bidimensionnalité de base des branches latérales et des amas de feuilles du* Terminalia catappa L. *a considérablement simplifié l'analyse de la géométrie des branches.* »[3]

Dans son livre de 1971, H. S. Horn avait déjà indiqué l'intérêt de l'étude de telles dispositions foliaires simples, en monocouches superposées, si l'on voulait avoir des chances de prendre en compte quantitativement et facilement le rôle de la couronne dans la stratégie adaptative de l'arbre. Mais, selon Fisher, cette simplicité n'est tout de même pas suffisante si on ne lui adjoint pas l'approche par la simulation sur ordinateur. En effet, malgré cette relative simplification, les calculs d'optimisation de paramètres qu'il cherche à mener ne peuvent pas plus être conduits analytiquement dès lors qu'il n'est pas possible de résumer analytiquement les caractéristiques de la structure résultant des divers paramètres géométriques choisis au départ. Il faut donc bien simuler *toute* la couronne sur ordinateur.

En 1977, Fisher et Honda publient ainsi la première simulation géométrique réaliste d'un *Terminalia* de moins de cinq ans. Honda conçoit pour cela un programme en assembleur implémenté sur un ordinateur Olivetti P652 doté d'une extension de mémoire (Olivetti DAS 604) et d'un traceur de courbes WX 535 de chez Watanabe Sokuki[4]. Les résultats sortent sous forme de dessins sur papier. Dans le « modèle mathématique »[5], cœur du programme, ils utilisent un ensemble de règles géométriques déterministes dont les paramètres sont d'abord calés sur les moyennes des mesures effectuées sur le terrain par Fisher. Le programme dessine donc au départ un arbre moyen, en quelque sorte, dont le port rappelle bien, intuitivement, ceux que l'on rencontre dans les parcs japonais ou dans le Jardin Tropical de Miami.

En 1978, après s'être finalement rencontrés à la fin de l'année 1977, à Kobe, lors d'un voyage d'études de Fisher, les auteurs décident de prolonger leur collaboration de manière à tester l'usage qui pourrait être fait de la simulation dans la question de la géométrie adaptative, question propre à la problématique scientifique de Fisher. Or, à l'évidence, il s'agit là d'un problème de recherche d'optimum. Comme la couronne n'est pas résumable analytiquement mais

[1] Nous tenons ces informations d'une communication personnelle, par courrier électronique, en date du 28 octobre 2003, avec Jack B. Fisher lui-même.
[2] [Fisher, J. B. et Honda, H., 1979a], p. 634.
[3] "A major limitation to quantitative studies of the adaptive geometry of trees is the three-dimensional complexity of both branches and leaf orientations which has inhibited construction of reasonable structural models. However, the basic two-dimensionality of lateral branches and leaf clusters in *Terminalia catappa L.* greatly simplified the problem of analysing branch geometry", [Fisher, J. B. et Honda, H., 1979a], p. 633.
[4] [Fisher, J. B. et Honda, H., 1977], p. 377.
[5] Selon leur propre expression : « mathematical model », [Fisher, J. B. et Honda, H., 1977], p. 378.

seulement réplicable par une simulation, il faut donc procéder à un grand nombre de simulations réalistes à partir de diverses combinaisons possibles de paramètres autour de leurs moyennes réelles et mesurer *a posteriori*, à chaque fois, c'est-à-dire sur chaque structure dessinée, l'efficacité de la captation de la couronne obtenue en énergie solaire. En 1979, comme on peut le voir dans les deux articles communs qu'ils publient dans la *Botanical Gazette*, afin d'évaluer à chaque fois la surface foliaire efficace, c'est-à-dire la surface totale diminuée des superpositions de certaines feuilles dans l'étage foliaire considéré et entre étages foliaires, Honda a alors recours à sa technique analytique d'évaluation de surface au moyen des domaines de Dirichlet. Les feuilles y sont assimilées à des cercles qui se superposent et qui laissent apparaître des polygones dont la surface est évaluable analytiquement lorsque l'on connaît les angles de ramification des rameaux et d'insertion des feuilles sur ces rameaux.

Cette évaluation numérique est donc certes ponctuellement analytique, mais elle est bien là aussi effectuée *après* que les règles de génération pas à pas de la structure géométrique l'aient construite. C'est à ce niveau-là que le choix du *Terminalia* facilite l'utilisation de la simulation réaliste pour une recherche d'optimum. Cette recherche est faite par tâtonnements et comme empiriquement : Fisher et Honda lancent un grand nombre de simulation de couronnes en faisant varier à chaque fois (dans des limites réalistes situées autour de la moyenne mesurée sur le terrain) l'angle de ramification des rameaux à l'intérieur des étages foliaires et ils font évaluer à chaque fois par l'ordinateur la surface d'insolation selon la technique de Dirichlet. Ils trouvent ainsi un angle de ramification optimal pour l'insolation, compte-tenu des contraintes morphologiques de l'espèce considérée[1]. Le résultat est que, conformément à leurs espérances, cette valeur est trouvée très proche de la valeur moyenne réelle. Un peu après, Honda et Fisher montrent qu'il en est de même pour le « ratio de longueur » optimal[2]. L'arbre réel est donc passablement optimal d'un point de vue énergétique par rapport à ses règles de croissance géométriques. Ce résultat, assez remarquable, et obtenu en fait rapidement après leur premier travail de 1977, fait également l'objet d'une courte publication dans la revue *Science* du mois de février 1978[3].

Devant ces résultats, il y a donc lieu de considérer que la simulation géométrique, avec ses quelques paramètres simples, a réussi à capter une variabilité structurelle essentielle qui se trouve être l'objet d'une sélection pour un optimum fonctionnel dans la plante. Cependant, Fisher a conscience qu'il serait trop simpliste de ne relier les déterminismes des paramètres architecturaux de la couronne de l'arbre qu'à la seule optimisation de la surface foliaire. Le jeu de l'optimisation doit être au total plus complexe, selon lui. Tout au plus ont-ils montré par là le rôle vraisemblablement très important de cette optimisation particulière dans les premières années de la vie *du Terminalia*, dès lors que le modèle géométrique ne vaut d'ailleurs plus pour des individus plus âgés[4].

La plante conçue comme métapopulation

Une fois de plus, dans cette recherche d'optimum, même si on lance empiriquement plusieurs simulations sur ordinateur, l'usage de la simulation reste donc celui d'un argument théorique ; ce qui doit être tempéré par le fait que le modèle mathématique ne prend pas en considération un certain nombre de facteurs, dont le vieillissement et l'évolution des règles du

[1] Voir [Fisher, J. B. et Honda, H., 1979a] et [Fisher, J. B. et Honda, H., 1979b].
[2] [Honda, H. et Fisher, J. B., 1979], p. 3875.
[3] [Honda, H. et Fisher, J. B., 1978], pp. 888-889.
[4] [Fisher, J. B. et Honda, H., 1979a], p. 639.

modèle lui-même. En effet, il est à remarquer que les simulations de Honda reposent toutes, dès le début, sur l'hypothèse d'un fonctionnement stationnaire des règles de ramification. Cette hypothèse fait fi du vieillissement de l'arbre et de ses parties. Elle part du principe que le déterminisme génétique est certes divers et difficile à résumer statistiquement (là est la prise en compte de son hétérogénéité) mais reste en fait constamment le même pour les mêmes opérations (ramification, élongation) et les mêmes types d'organes tout au long de la vie de la plante. Ce qui n'est grossièrement vrai que pour les plantes jeunes.

Or, en 1979, paraît un article qui fera grand bruit dans les domaines de la botanique et de la morphologie végétale et qui contribuera à réactiver la sensibilité des botanistes au vieillissement différentiel des parties d'une plante et à la non-stationnarité de leurs règles de croissance au cours de leurs vies. Il s'agit de *The plant as a metapopulation* du « démographe des plantes »[1] irlandais James White[2], paru dans *Annual Review of Ecological Systems*. Sous l'influence de ses propres problématiques de biologiste des populations, habitué à percevoir des populations dans un monde végétal où la différence entre population et individu reste souvent problématique[3], James White ne prétend certes pas inventer la suggestion de concevoir la plante comme une colonie d'individus plus ou moins autonomes. Cette idée peut en effet être retrouvée incidemment mais régulièrement chez plusieurs auteurs, dès le 18ème siècle. Mais dans cet article tout à la fois synthétique et séminal, White retrace d'abord l'histoire conceptuelle assez complète de cette conception populationnelle de la plante individuelle et montre ensuite avec force le poids évident qu'elle doit prendre désormais aux yeux du botaniste et du morphologiste des plantes en indiquant les convergences qui se font jour. Ce point de vue, déjà payant en biologie des populations, mais rendu explicite et éclatant par White contribue, à l'époque, à mettre davantage en avant la variabilité des déterminismes génétiques à l'*intérieur* d'un individu végétal au cours de son ontogenèse, donc au cours de sa vie. En plaidant pour un rapprochement résolu entre la démographie des plantes et la morphologie des plantes, White met ainsi l'accent sur la plasticité des déterminations génétiques au cours de la morphogenèse[4]. Dans l'immédiat, il ne pense cependant pas que l'on puisse remplacer l'ancien « idéalisme morphologique »[5] par un autre, de nature populationnelle celui-ci, mais il considère qu'il revient au contraire à chaque chercheur de déterminer pragmatiquement l'unité élémentaire qu'il doit considérer à chaque fois pour sa propre problématique.

Une limite de la simulation géométrique

Mais donc si l'arbre est aussi une population vouée à une grande plasticité génétique dans ses organes et au cours de sa vie, l'argument généticiste et informationnel de Honda, comme celui de Cohen d'ailleurs, et qui faisait le soubassement de leur approche commune par une simulation avant tout fondée sur un modèle mathématique simple, perd beaucoup de sa pertinence. Il se pourrait bien que la recherche d'un modèle théorique minimal déterminant une morphogenèse aux résultats complexes et contre-intuitifs, dès lors qu'elle se faisait toujours sous couvert d'une détermination génétique supposée stationnaire au cours de la vie du végétal et de sa séquence de

[1] "plant demographers", [White, J., 1979], p. 122.
[2] Alors en poste au Département de Botanique du *University College* de Dublin.
[3] Cela est notamment évident pour les plantes à rhizomes. Voir [White, J., 1979], p. 122.
[4] [White, J., 1979], pp. 133-134.
[5] Selon son expression : "morphological idealism", [White, J., 1979], p. 134.

différenciations cellulaires, ne vaille pas plus que les approximations théoriques du type de la « loi de Horton ».

Fisher reconnaît donc là une limite majeure à la simulation sur ordinateur : il faudrait en fait complexifier encore et toujours le modèle mathématique sous-jacent à la simulation en y insérant l'historicité des déterminismes génétiques, sans même oublier les effets de l'environnement. Mais le problème est que cette complexification n'est justement pas souhaitable pour l'usage qu'il veut faire de la simulation. L'usage théorique de la simulation en serait alors perdu : elle ne pourrait plus servir à produire des résultats théoriques simples concernant la nature des quelques paramètres qu'on voudrait voir apparaître comme seuls décisifs dans l'élaboration de la stratégie adaptative de la plante, par exemple. Elle ne servirait plus à désigner et éventuellement à quantifier ces quelques paramètres-clés. Si le modèle sous-jacent se complexifie, ce qui est certes toujours possible en droit si ce n'est en pratique, la simulation ne peut plus véritablement servir d'argument théorique, car elle ne peut plus immédiatement aider à une meilleure compréhension physiologique et fonctionnelle de la structure. Or, c'est cela que privilégie Fisher. Et c'est bien là que l'on peut discerner clairement le rôle épistémique implicite que Fisher donne aux simulations de croissance d'arbres sur ordinateur : une simple prolongation de l'expression *théorique* des concepts biologiques et un moyen de tester rigoureusement leur pertinence dans des cas ponctuels. La réplication de l'arbre n'y est pas voulue pour elle-même. Elle n'est pas non plus réellement considérée comme un substitut d'expérimentation mais plutôt comme le substitut d'une procédure aléatoire d'optimisation d'une loi mathématique complexe, comme un calcul. Chez lui, la figuration réaliste de l'arbre est donc inféodée à un projet de compréhension qui, en dernière analyse, puisse quitter son support technologique et computationnel afin de grossir le nombre des savoirs biologiques et botaniques déjà exprimables en langage naturel.

Ainsi, de façon significative, à partir de 1979, considérant que la simulation ne lui apportera plus un surcroît de compréhension biologique[1], Fisher va progressivement cesser toute collaboration réellement active avec les simulateurs de plante sur ordinateur. Selon lui, tout au plus la simulation pourra-t-elle encore faire illusion en recourant à des modèles toujours plus complexes. Mais ces derniers resteront longtemps beaucoup trop simplificateurs d'un point de vue biologique. D'ailleurs, encore faudrait-il pour cela que les ordinateurs aient une puissance de calcul suffisante. Ce qui ne lui ne semble pas non plus être vraiment le cas, y compris en 1986 ou même encore en 1992[2]. Après une période de vif espoir, Fisher entre donc dans une phase de doute résolu quant à la pertinence des simulations sur ordinateur pour la biologie théorique.

En 1983, pourtant, il contacte son collègue informaticien de l'Université de Floride, John Craig Comfort[3], afin de tâcher de donner une autre ampleur à ses simulations. Son idée est de profiter des innovations en programmation et en calcul de l'informatique afin de généraliser à d'autres architectures d'arbres le programme géométrique de Honda. Dans les années 1970, Comfort est en effet un des précurseurs de la simulation répartie à multi-processeurs : pour traiter le calcul sur une grande masse de données, notamment graphiques, il a pour habitude de mettre en réseau des micro-processeurs disponibles dans le commerce[4]. D'autre part, il suit de près l'entreprise de standardisation des programmes de simulations graphiques sur ordinateur telle qu'elle a été effectuée à partir de 1974, dans un contexte militaire. En 1983 donc, sous l'impulsion

[1] Nous devons cette précision à l'entretien par courrier électronique que nous avons eu avec Fisher le 28 octobre 2003.
[2] [Fisher, J. B., 1992], p. s144.
[3] Qui donnera son nom au laboratoire d'informatique de la *Florida International University*. Voir le site http://www.aul.fiu.edu/docs.
[4] Voir [Weeks, C. L. et Comfort, J. C., 1983], p. 655.

de Fisher, il engage une étudiante, Carol Lewis Weeks, à appliquer à la simulation des arbres le nouveau standard conçu conjointement par l'Académie Militaire de West Point et la station expérimentale militaire de Waterways : le *Graphics Compatibility System* (GCS). Ce logiciel propose des routines de gestion et de manipulation de graphismes tridimensionnels. Il est basé sur FORTRAN et est conçu pour être indépendant du matériel.

Weeks traduit alors le programme de Honda dans des structures de données hiérarchisées. Elle nomme « modèle structurel » le cœur du modèle géométrique sous-jacent. Le logiciel est rapide et les résultats graphiques, des arbres filiformes, sont élégants et maniables selon toutes les perspectives d'observation voulues. Weeks parvient à faire représenter à ce même modèle mathématique trois essences différentes d'arbres tropicaux[1]. Elles ont toutes les trois pour caractéristiques de présenter des unités de croissances discrétisées simples et obéissant à des lois de ramification formulables soit logiquement (en fonction de lois d'exclusion généralement observées dans l'espace) soit analytiquement (en fonction du flux global de nutriments accédant au rameau porteur). Certains des paramètres de ces ramifications conditionnelles dépendent eux-mêmes de lois statistiques normales dont l'utilisateur a la charge d'entrer la moyenne et la variance. Ces données sont disponibles grâce aux tables dont dispose Fisher. La validation des simulations est seulement visuelle : le botaniste Fisher atteste de leur crédibilité[2].

Pour des raisons peut-être personnelles et que nous n'avons pu mettre au jour, Weeks ne continuera pas ce travail par la suite[3]. En tous les cas, Jack B. Fisher ne favorisera pas le développement d'une telle solution informatique. En fait, il ne croira pas à la possibilité de rendre compte ainsi de toutes les architectures. La structure de données de Weeks, même si elle fait place à des paramètres probabilistes, reste trop spécifique. Et, dans cette infrastructure informatique uniquement sensible à la probabilité et à l'angle de ramification, la plasticité botanique ne trouvera pas encore de quoi donner toute son ampleur. Fisher ne sera donc pas davantage convaincu par cette tentative de généralisation.

Simuler pour tester un argument théorique

De son côté pourtant, au cours des années 1980, Hisao Honda rencontrera encore des échos favorables de la part d'autres botanistes. Et il se lancera dans une collaboration assez intensive, notamment avec d'autres collègues américains que lui indique Fisher. En 1980, il rejoindra ainsi quelque temps à Harvard le botaniste et morphologiste américain Philip Barry Tomlinson[4]. Mais, dans tous les travaux de simulation qui suivront, Honda conservera une conception minimaliste du modèle géométrique sous-jacent car, comme Fisher au début de leur collaboration, Tomlinson et ses collègues utiliseront sa plate-forme de simulation pour développer

[1] Le Terminalia, le Cameraria et le Tabernaemontana. Voir [Weeks, C. L. et Comfort, J. C., 1983], p. 649.

[2] "While no photographs of equivalent ages are immediately available, J. B. Fisher, of Fairchild Tropical Garden, has testified to the botanical reasonableness of the simulated structures", [Weeks, C. L. et Comfort, J. C., 1983], p. 654.

[3] Il est possible qu'à cette époque-là, Comfort et Weeks aient eu connaissance des travaux bien plus avancés de l'école française du CIRAD. Ces derniers avaient en effet été publiés entre 1981 et 1983. Nous les resituerons bientôt dans leur contexte d'apparition.

[4] P. B. Tomlinson est un anglais d'origine. Il fait des études de biologie et de botanique à l'Université de Leeds, en Angleterre, entre 1949 à 1955. En 1955, il y obtient un doctorat en botanique. Ses recherches touchent principalement à l'anatomie systématique des monocotylédones et à la morphologie développementale des arbres et des forêts. Entre 1965 et 1971, il est attaché de recherche auprès de l'institut de foresterie *Harvard Forest* de l'Université d'Harvard. À partir de 1971, il devient professeur de Biologie à Harvard et chercheur rattaché au Jardin Tropical de Fairchild en Floride. Il sera professeur à Harvard jusqu'en 2001. Entre-temps, il collabore étroitement avec l'école française d'architecture végétale de Francis Hallé et Roelof A. A. Oldeman. Nous retrouverons cette école plus bas.

des *arguments théoriques* concernant des règles développementales particulières supposées être à l'œuvre dans la couronne de l'arbre. Ce sera par exemple le cas pour un article dont l'objectif sera d'indiquer qualitativement le rôle des interactions entre branches voisines dans la ramification[1]. Honda sera ainsi ponctuellement amené à complexifier son modèle géométrique en ajoutant un plan de ramification oblique et orientable dans l'espace[2], par exemple. Mais il est remarquable que pendant vingt ans, il utilisera pratiquement toujours le même formalisme géométrique de ses débuts. Quand il se trouvera à Harvard, dans le laboratoire de Tomlinson, les gros calculs seront certes effectués sur un IBM 370 du bureau des Technologies de l'Information de l'Université. Mais un indice d'un certain conservatisme de sa part se manifeste dans le fait que, jusqu'en 1984, il concevra toujours ses simulations dessinées à partir de son ordinateur Olivetti et du traceur de courbes Watanabe[3]. À partir de 1984 cependant, pour des raisons de limitation de mémoire, lorsqu'il collaborera à Harvard avec Rolf Borchert, un physiologiste de l'Université du Kansas, Honda utilisera un programme en FORTRAN implémenté cette fois-ci sur un Système Honeywell et les dessins seront imprimés sur un traceur de courbes Hewlett-Packard HP21[4]. Comme l'arbre considéré (un *Tabebuia rosea*) devra être simulé au moins jusqu'au 15ème ordre de ramification, cela afin d'y insérer la prise en compte d'un flux métabolique (objet du test théorique précis, en l'occurrence), la mémoire minimale théoriquement requise sera alors de 2^{15} = 32768 points de liaison, ce qui est bien supérieur à ce que l'ordinateur initial pouvait supporter. Sur le système Honeywell lui-même, il faudra encore réduire quelque peu le nombre de points en construisant des arbres *a priori* symétriques au regard de certains axes privilégiés. C'est à partir de là, notamment, que la mémoire et la puissance de calcul des machines se révéleront très limitantes, aux yeux de Honda lui-même.

Mais dans tous ces travaux, que ce soit avec Tomlinson, Borchert ou, plus récemment, avec le botaniste du Jardin Botanique de Tsukuba, Hiroakki Hatta[5], Honda met à disposition une structure de simulation susceptible de *tester des hypothèses théoriques isolées*. Avec lui, la simulation sur ordinateur à résultats graphiques, visibles et intuitifs, garde donc encore son attache originelle dans le calcul scientifique à destination de développements ou d'arguments *théoriques*. Elle ne sert pas à prédire précisément des croissances d'arbre en vue d'une action sur la plante visant à contrôler et améliorer sa croissance, comme cela pourra être le cas par ailleurs, ainsi que nous le verrons. Elle ne vise pas à se substituer à des expérimentations en champ. Elle vise seulement à accroître une compréhension ou la crédibilité d'une explication conceptuelle possible des déterminismes morphogénétiques.

Bilan sur la simulation géométrique

Finalement, l'approche par simulation géométrique a été la première à converger véritablement, et de manière quantitative, vers la botanique et vers la biologie des plantes supérieures. Elle a contribué à rendre possibles certains calculs déductifs qui intervenaient dans le test de certaines hypothèses générales propres à la biologie du développement théorique. À cause de l'intrication de multiples chaînes causales, comme de leurs rétroactions, au cours des phénomènes de morphogenèses du vivant, ces suivis déductifs ne sont pas en effet aisément

[1] Voir [Honda, H., Tomlinson, P. B. et Fisher, J. B., 1981].
[2] Voir [Honda, H. et Tomlinson, P. B., 1982] et [Borchert, R. et Honda, H., 1984].
[3] [Honda, H., Tomlinson, P. B. et Fisher, J. B., 1981], p. 570 et [Honda, H. et Tomlinson, P. B., 1982], p. 2.
[4] [Borchert, R. et Honda, H., 1984], p. 185.
[5] [Honda, H., Hatta, H. et Fisher, J. B., 1997].

accessibles à la pensée humaine, qu'elle soit formalisée ou non : il n'en existe pas de modèle mathématique analytique. Et leurs résultats peuvent donc être contre-intuitifs. La seule solution est de simuler par ordinateur pour suivre pas à pas l'entrelacs des rapports entre les parties comme entre les parties et le tout de l'organisme.

Mais lorsque l'on sait que la plante est une « méta-population », lorsque que l'on voit bien que ces chaînes causales elles-mêmes évoluent (vieillissement des méristèmes), une complexité supplémentaire est ajoutée. Et il est permis alors de douter des apports de la simulation elle-même pour la botanique théorique. Si les règles locales changent au cours du temps, une approximation par la récursivité informatique sera-t-elle encore raisonnable ? Existe-t-il une règle du changement des règles ? Et comment la trouver ?

Il se trouve que c'est dans un cadre agronomique que cette question de la plasticité et de l'évolutivité des règles locales de morphogenèse sera affrontée et en partie résolue. Mais il faut pour cela que le chercheur simulateur apprenne à faire flèche de tout bois, à ne s'orienter selon aucun formalisme préférentiel *a priori*. Il faut aussi qu'il ne se sente pas empêché par des préférences théoriques ou épistémologiques trop contraignantes. Alors, ce sera le moment de procéder à des simulations mixtes, sans prévention. N'est-il pas possible en effet d'intégrer ces différents points de vue simulants, ces différentes perspectives, de manière à les faire se rapprocher encore plus de la réalité botanique ? Mais encore faut-il qu'il y ait un besoin, une demande, pour cela qui ne soit pas uniquement d'ordre spéculatif.

À partir de maintenant, pour comprendre précisément comment une telle mixité et une telle convergence agrégeante ont pu voir le jour, cela à la différence des autres approches, nous focaliserons plus particulièrement notre historique sur la naissance et le développement de la simulation architecturale. Cette focalisation qui orientera désormais notre exposé peut être justifiée par au moins deux raisons : d'une part, alors que les recherches en phyllotaxie pouvaient certes se targuer de retomber sur certaines observations, seule la simulation architecturale a pu finalement formaliser la plante en sa totalité ; d'autre part, seule cette même approche a rendu cette formalisation totale de la plante à même d'être calibrée quantitativement et donc de servir sur le terrain. C'est donc elle, et elle seule, qui a fait véritablement entrer l'histoire de la modélisation de la forme des plantes dans une nouvelle ère : celle des convergences avec les pratiques et les problématiques de terrain. Nous n'oublierons pas pour autant de rendre compte, si nécessaire, des propositions alternatives, spéculatives ou pragmatiques, qui n'ont pas cessé de jalonner ces trois dernières décennies. Mais nous leur donnerons moins de poids que précédemment car les propositions épistémologiques qui en ont émanées n'ont pas été véritablement innovantes au regard de ce qui s'est passé à la même époque dans l'école de simulation architecturale. En particulier, elles ne permettent pas d'expliquer la certaine hégémonie à laquelle est parvenue aujourd'hui cette école.

Dans un premier temps, nous allons donc restituer la période de formation puis le contexte institutionnel du chercheur qui, le premier, a proposé cette approche. Nous serons ensuite disposé à comprendre comment, autour de lui et autour de sa méthode, tout un laboratoire puis toute une école se sont enfin constitués. En particulier, nous nous interrogerons sur les rapports qu'a pu entretenir ce type de modélisation avec celui, plus traditionnel et mieux installé, de la biométrie, comme avec celui, toujours controversé, de la biologie théorique.

CHAPITRE 21 – La période de formation et le contexte institutionnel de l'IFCC (1966-1971)

Cette troisième manière de simuler la morphogenèse des plantes par ordinateur, cette manière que nous dirons « mixte » dans un premier temps, a été développée par un ingénieur agronome français en poste en Côte-d'Ivoire au début des années 1970. Au contraire des précédentes, elle naissait clairement d'un besoin pragmatique. Il y a donc un certain nombre de causes plus ou moins fortuites mais conjointes qui ont présidé à son émergence. Contrairement à ce qui se produisit pour les auteurs précédents, ces raisons ne sont plus uniquement spéculatives, rhétoriques ou esthétiques. Elles sont tout à la fois personnelles, institutionnelles et politiques. Afin de pouvoir comprendre comment elles concoururent, donnons donc d'abord quelques éléments de la biographie intellectuelle de ce chercheur. Ensuite, nous exposerons le contexte politique et institutionnel ainsi que les raisons plus particulièrement scientifiques et techniques de ce travail.

Philippe de Reffye naît en 1947[1]. Lorsqu'il commence ses études en mathématiques supérieures, au lycée Hoche de Versailles, il se trouve d'emblée en porte-à-faux par rapport à l'idée qu'il se fait de la science et des mathématiques en particulier. Le principe gouvernant alors ces classes et consistant à favoriser l'absorption maximale en un temps minimal de savoirs mathématiques et physiques, par la suite plus ou moins bien assimilés, lui convient assez peu. Pourtant, depuis longtemps déjà, il veut se diriger vers l'étude des sciences, car la capacité qu'avaient eu les grands génies du passé (Galilée, Kepler, Newton, Maxwell…) à représenter de façon mathématique les grandes lois de la nature lui avait laissé une très forte impression : il en avait conçu une image idéalisée du travail des scientifiques. À l'époque de sa formation initiale, la science lui apparaît donc comme l'activité de l'esprit humain qui a le privilège de bien savoir user de cet outil unique en son genre pour le déchiffrement du monde et de ses lois : les mathématiques. Mais soumis au rythme très rude de la classe de mathématiques supérieures et au vu de ses résultats décevants, cette vision idéalisée de la science l'abandonne quelque peu. Il se rend alors à l'évidence qu'il lui conviendrait mieux de poursuivre dans une classe préparatoire aux écoles d'agronomie. Cette réorientation vers l'agronomie est également une façon pour Philippe de Reffye de renouer avec son goût pour les arbres et la botanique qu'il exerce dans le parc de Versailles et dans le jardin botanique du domaine de Chèvreloup[2]. À la fin de sa classe de mathématiques spéciales, il est reçu à l'ENSAT (Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Toulouse).

On est alors en 1968, période d'agitation s'il en est, surtout dans le domaine universitaire. Si l'on ajoute à cela le fait que son goût pour la science s'est entre-temps quelque peu étiolé et que, dans ce genre d'école supérieure, l'intensité du travail demandé n'a rien à voir avec celui des classes préparatoires, on comprend que son investissement est moindre pendant les trois années que dure sa formation comme ingénieur agronome. Aussi n'est-il toujours pas réellement fixé sur ce qu'il veut faire lorsqu'il termine sa formation à l'ENSAT. Néanmoins, suite à une incitation de sa

[1] Pour ce paragraphe, nous nous sommes notamment appuyé sur les indications fournies par de Reffye lui-même, au cours de notre entretien de 2001 : [Reffye (de), Ph. et Varenne, F., 2001].

[2] Le jardin botanique de Chèvreloup, situé dans le parc de Trianon à côté de Versailles, a été créé par le botaniste du Jardin du Roi (futur Jardin des Plantes), Bernard de Jussieu, en 1759. Il est annexé au Museum National d'Histoire Naturelle depuis 1922. Il devient un arboretum par décret en 1927. On y trouve actuellement plus de 2500 espèces et variétés d'arbres des régions tempérées. Les plantes tropicales sous serres du Jardin des Plantes y ont été transférées depuis 1986.

fiancée, il est prévu qu'à sa sortie de l'école il parte cinq ans en Afrique pour le compte de l'IFCC (Institut Français du Café et du Cacao et autres plantes stimulantes) dans le cadre d'une coopération. En échange de quoi l'IFCC prend en charge le DEA de génétique qu'il souhaite ajouter entre-temps à son cursus dans l'année de sursis qui lui reste et qui sépare sa sortie de l'ENSAT de son départ en Afrique.

L'intérêt de de Reffye pour la génétique, alors assez peu commun chez les ingénieurs agronomes, peut rétrospectivement s'expliquer si l'on se réfère à un épisode assez précis de sa vie d'étudiant. À l'ENSAT, en effet, toujours poussé par son amour un peu idéaliste pour les végétaux, il avait auparavant suivi l'option de troisième année intitulée « la défense des végétaux ». Il se voyait devenir ainsi une sorte de « docteur des plantes »[1]. Mais ce qu'on y apprenait le déçut beaucoup et le troubla même en quelque manière : la seule chose que l'on y enseignait, à ses yeux, était la liste des divers types de produits qu'il fallait mettre sur les plantes pour les protéger. De même que son goût pour les mathématiques appliquées avait auparavant rencontré de graves déconvenues, il lui apparaissait que son penchant pour le végétal et le soin qu'on y apporte trouvait, là aussi, une issue très décevante. Décidément, le monde de la recherche ne semblait pas pouvoir s'ouvrir à lui ! Or, au même moment, il se trouva un peu par hasard que son goût initial pour les mathématiques appliquées put renaître mais sans faire rejaillir les mêmes vexations que par le passé. En effet, pendant qu'il effectuait cette dernière année à l'ENSAT, son camarade d'appartement suivait un cursus de génétique fondamentale à l'Université Paul Sabatier de Toulouse. Philippe de Reffye fut tout de suite très intéressé. Et il suivit pendant un an les mêmes cours que son camarade. Ce qu'il retrouve alors et qui l'intéresse avant tout dans la génétique est son recours à des modèles théoriques à la fois formels et efficaces.

À sa sortie de l'ENSAT, c'est donc dans le laboratoire du professeur Sadi Essad, au Centre National de Recherches Agronomiques de l'INRA de Versailles, qu'il prépare son DEA de génétique pour lequel il prend par ailleurs une inscription à l'Université d'Orsay auprès du professeur Yves Demarly, professeur de génétique appliquée et d'amélioration des plantes. Essad est un cytogénéticien, c'est-à-dire un spécialiste de la génétique et des lois de transmission des caractères héréditaires au niveau cellulaire et, plus spécifiquement, chromosomique. Il travaille comme chercheur dans le laboratoire de cytogénétique de l'INRA de Versailles, laboratoire alors dirigé par Marc Simonet. Essad s'intéresse au devenir des croisements entre différentes espèces de graminées[2]. Pour ce faire, il analyse le caryotype (la répartition des chromosomes lors de la mitose) des hybrides obtenus. C'est donc avec lui que de Reffye finit par reprendre goût aux mathématiques et à la recherche biologique formelle, puisqu'il apprend à travailler sur des chromosomes et à appliquer ainsi quelques connaissances mathématiques. Or, dans quelle mesure, sous l'encadrement d'Essad, de Reffye apprend-il à marier les mathématiques et la biologie, notamment dans ce secteur spécifique de la génétique appliquée à l'agronomie ? On ne peut répondre précisément que si l'on se penche un moment sur l'objectif et la nature plus particulière des travaux effectués par de Reffye à l'INRA pendant cette année universitaire 1970-1971. Ces travaux ont eu un certain écho dans la mesure où ils furent poursuivis par Essad après le départ de de Reffye. Ils donnèrent lieu à publication, un peu plus tard, en mai 1973[3]. Cette publication tardive présentera de Reffye comme premier signataire.

---

[1] Voir l'entretien [Reffye (de), Ph. et Varenne, F., 2001], p. 1.
[2] Voir sur ce point [Cousin, R. et Poupardin, D., 1996], p. 68.
[3] Dans le Compte-Rendu de l'Académie des Sciences qui correspond à la séance du 9 mai 1973. Le titre de cette note est : « Sur l'existence possible d'une unité naturelle de longueur des chromosomes métaphasiques de *Lolium perenne L.* : le module. »

Des modèles de la génétique au « module » des chromosomes

La question initiale qui oriente le travail de DEA est celle de savoir s'il est possible de mieux caractériser le caryotype, ou profil chromosomique, de certaines graminées : les *ray-grass* anglais ou *Lolium perenne*. Si l'on veut pouvoir produire des hybrides raisonnés et eux-mêmes fertiles de toutes plantes, il est en effet indispensable de connaître et de savoir reconnaître précisément les homologies de structure entre les chromosomes des deux génomes parentaux[1]. À défaut de telles homologies, l'appariement des chromosomes parentaux ne pourra s'effectuer correctement. Or, en ce début des années 1970, les cytogénéticiens sont face à des données très variables et peu sûres. Au microscope optique, et même avec les techniques de traitement et de coloration, la morphologie des chromosomes apparaît très variable et n'est que très schématiquement représentable[2]. On sait que la variabilité des longueurs absolues apparentes des chromosomes tient à leur propriété d'être spiralés, conformément à une idée déjà proposée par le botaniste allemand Baranetzki en 1880 et précisée entre-temps par le biologiste britannique Cyril Dean Darlington (1903-1981) en 1937[3]. Mais la seule parade proposée consiste à établir le tableau des différentes longueurs caractéristiques du caryotype, ou caryogramme, en longueurs relatives. Ainsi, pour chaque cellule, on détermine d'une part les rapports de longueurs entre les bras de chacun de ses chromosomes (rapports centrométriques), d'autre part les rapports entre les longueurs de ses chromosomes (longueurs relatives).

C'est là que la suggestion propre à de Reffye et Essad intervient. Lorsqu'elle est publiée, de Reffye est déjà en poste en Côte-d'Ivoire depuis deux ans. Cette contribution, même modeste, semble tout de même significative car elle fait intervenir la notion de « module », tout en prêtant aux mathématiques élémentaires qui l'accompagnent un rôle descriptif sans qu'elles soient pour autant statistiques. Elle ne sera pas négligeable pour la conception que de Reffye se fera de la modélisation des formes dans les sciences du vivant. Qu'en est-il exactement ?

Philippe de Reffye et Sadi Essad proposent qu'à l'aide de la formule mathématique classique (**L =** $\sqrt{(l^2+\pi^2 n^2 d^2)}$ exprimant la longueur développée **L** d'une spirale à partir de sa longueur apparente ***l***, du nombre ***n*** et du diamètre ***d*** de ses spires[4], on s'attache à chercher les longueurs relatives *développées*, c'est-à-dire réelles, des chromosomes. Dès lors que l'on a repéré le nombre de spires de la spirale, il est en effet possible de faire le calcul. Les longueurs ainsi développées s'avèrent remarquablement stables : les coefficients de variation passent de 30% à 5% et les écart-types obtenus sont dans la marge d'erreur des mesures. Il leur est donc possible de présenter des caryogrammes précis en longueurs développées. Ils introduisent ce faisant une représentation plus « réaliste » du caryotype, dans la mesure où elle élimine systématiquement les effets de la morphologie des chromosomes en métaphase[5] sur leur longueur réelle. On se trouve plus proche de la constitution effective des chromosomes, d'où l'adjectif « naturelle » de l'expression « unité naturelle de longueur » intervenant dans le titre de la communication.

---

[1] Cette homologie stricte est nécessaire pour qu'après la méiose du génome de l'hybride (la méiose est cet enchaînement de deux divisions cellulaires de cellules diploïdes donnant naissance à des cellules haploïdes, appelées gamètes ou cellules sexuelles), l'appariement des chromosomes parentaux ou zygotène se fasse sans problème pour les cellules filles.
[2] [Reffye (de), Ph. et Essad, S., 1973], p. 2661.
[3] [Reffye (de), Ph. et Essad, S., 1973], p. 2661.
[4] [Reffye (de), Ph. et Essad, S., 1973], p. 2662.
[5] Phase de la mitose pendant laquelle les chromosomes sont très condensés et se présentent en plaque équatoriale avant de se cliver en chromosomes fils. Voir [Vogel, G. et Angermann, H., 1984, 1994], p. 79.

Mais le résultat qui leur paraît le plus important et le plus révélateur d'une propriété « naturelle » n'est pas celui-là. Avec cet instrument de mesure rendu plus stable mais aussi plus « réaliste » dirions-nous[1], ils peuvent soulever un autre problème et tenter de le résoudre. D'habitude, en effet, « la longueur relative de chaque type de chromosome est […] déterminée soit par rapport à un type particulièrement reconnaissable [de chromosome], soit par rapport à la longueur moyenne de l'ensemble des chromosomes de chaque cellule »[2]. Dans ces techniques antérieures, le but, on le voit bien, consistait donc à trouver un étalon de mesure que l'on jugeait fiable soit parce qu'il était reconnaissable et donnait lieu à une mesure absolue supposée stable, soit parce qu'il était fictif mais néanmoins stable également parce que fondé sur des mesures lissées par un passage à la moyenne des mesures faites sur un même caryotype. Or, le fait expérimental que de Reffye et Essad communiquent à l'Académie prétend rendre relativement caduques de telles approches en révélant un fait naturel propre à la morphologie des chromosomes en métaphase :

« En effet, l'examen de ces données [les caryogrammes développés] révèle que toutes les longueurs développées obtenues pour les différents bras de chromosomes sont des multiples d'une certaine longueur que nous avons appelée 'module' *(M). »*[3]

Ils poursuivent :

« Chez le Lolium perenne*, la longueur de ce module est de 0,74 µ et les bras de chromosomes en présentent de 5 à 12 […] Nous avons donc pu établir le "caryogramme modulaire" de cette espèce.*

Il est difficile d'admettre que l'apparition de ce multiple commun aux différents bras de chromosomes soit due à un simple coïncidence. Si l'existence d'un module se confirme dans d'autres espèces, on sera conduit à considérer ce module comme un élément important de la structure et de l'évolution des chromosomes. »[4]

Ainsi chaque bras de chromosome est « constitué par la juxtaposition d'éléments de longueur identique et relativement importante »[5]. Philippe de Reffye et Sadi Essad pensent avoir mis en évidence une caractéristique morphologique globale des chromosomes en métaphase. Du moins de Reffye en est-il plus convaincu qu'Essad[6] . Ce dernier n'écarte pas en effet l'idée que cela ne soit qu'un artefact provenant des mesures. En tout cas, le caractère potentiellement significatif de ce type de travail est la raison essentielle pour laquelle Essad choisit de présenter ce résultat assez rapidement et directement à l'Académie[7]. Grâce à une étude statistique doublée d'un modèle mathématique simple (la formule de la spirale), ils ont construit un outil de mesure qui les met en face d'une régularité morphologique autrement inaperçue. Même s'ils ne le présentent

[1] Parce que l'outil mathématique sert ici à exprimer et retrouver les longueurs supposées *réelles* à partir des longueurs apparentes ou mesurées.
[2] [Reffye (de), Ph. et Essad, S., 1973], p. 2661.
[3] [Reffye (de), Ph. et Essad, S., 1973], p. 2662.
[4] [Reffye (de), Ph. et Essad, S., 1973], p. 2662.
[5] [Reffye (de), Ph. et Essad, S., 1973], p. 2663.
[6] Cette information qui n'apparaît bien sûr pas dans la publication telle quelle nous a été donnée par Philippe de Reffye lui-même, lors d'un échange de courriers électroniques le 18 février 2003.
[7] Cette relative précipitation filtre à travers les mots de la dernière phrase du document : « Les travaux visant à approfondir ces données sont actuellement en cours et les premiers éléments seront présentés en détail ailleurs », [Reffye (de), Ph. et Essad, S., 1973], p. 2664.

pas comme tel, le mot qu'ils proposent pour désigner cette nouvelle régularité est emprunté à la terminologie de l'architecture classique telle qu'elle apparaît dès le traité de Vitruve (1er siècle avant J.-C.) : le « module » y est l'élément architectural qui sert de *mesure élémentaire* à quoi l'on rapporte par proportions, par nombres entiers donc, toutes les autres mesures de l'édifice.

Autrement dit, ce qui les intéresse dans ce résultat n'est pas seulement la possibilité de mesurer la longueur réelle du chromosome mais aussi celle de décompter les nombres entiers de modules présents sur chaque bras de chromosome pour mettre au jour une architecture globale. C'est un essai de formalisation non métrique et par réitérations. Rappelons que le terme de « modèle » est un cousin très proche de celui de « module » dont il provient étymologiquement. Le module serait ici le modèle d'une construction chromosomique élémentaire au sens où sa fonction consisterait à donner lieu à une véritable architecture constituée de simples réitérations. Le module remplirait donc bien cette fonction qu'on attribue en général aux modèles et qui consiste à résumer la structure. Mais le « module » est plus réaliste que le modèle en ce qu'il prétend construire une représentation sans résidus, sans restes, sans perte d'information. À ce titre, il n'est pas une abstraction ; sa nature est bien concrète : elle est homogène à celle de l'entité biologique à laquelle on s'intéresse, en l'occurrence le chromosome. En outre, de par cette règle de construction qu'elle manifeste, la morphologie des chromosomes en métaphase est donc implicitement apparentée à un artefact humain, à un ouvrage d'ingénieur, plus précisément d'architecte. La morphologie biologique particulière du chromosome est directement apparentée à une architecture. Elle est mathématisée mais par apparentement à une science de la conception. Cependant tout en étant réaliste, car mettant au jour une régularité bien réelle présente dans le chromosome, l'hypothèse du module reste essentiellement descriptive. Les auteurs admettent ainsi qu'ils ignorent le sens ou la fonction biologique d'une telle unité chromosomique :

« La correspondance biologique de ce module devra être recherchée en tenant compte de la situation intermodulaire du centromère et des constrictions secondaires. »[1]

Autrement dit, les deux auteurs avouent ne pas pouvoir encore formuler d'hypothèse à cet égard. Comme elle ne dispose pas d'une assise fonctionnelle avérée, la suggestion du « module » n'est présentée elle-même que comme hypothèse encore à tester[2]. La fonction du « module » dans cet article reste donc essentiellement méthodologique et descriptive. C'est tout au mieux celle d'une grille de lecture d'une organisation spatiale effective. En effet, l'application à des images de microscope d'une analyse statistique doublée d'un modèle mathématique *a priori* et supposé œuvrer à la déformation des données (la formule de la spirale) a mis au jour une réalité qui n'est pas fonctionnelle : d'un point de vue biologique, il ne s'agit pas de la mise au jour d'un phénomène physico-chimique ou de régulation fonctionnelle, mais d'une entité architecturale qui, en revanche, existe bien concrètement, au niveau macro-moléculaire. En un sens, Essad et de Reffye n'ont fait que redresser des images pour les rendre plus réalistes. Le rôle du modèle mathématique est de nous permettre ici d'adopter le point de vue sur l'image recueillie le plus « réaliste » possible dès lors qu'il nous décèle cette organisation modulaire ordinairement cachée[3].

---

[1] [Reffye (de), Ph. et Essad, S., 1973], p. 2663.

[2] D'où également le « possible » qui figure dans le titre de la communication : « Sur une existence *possible* d'une unité naturelle … »

[3] Si l'on voulait utiliser l'analogie avec la géométrie projective, on pourrait dire qu'ici le modèle mathématique n'a pas pour fonction de condenser les données mais plutôt de nous les donner sous la forme d'un géométral : sans plus de projection, donc sans perte d'information. Il s'agit de redresser les données pour donner à voir ce que Leibniz appelle lui aussi un géométral ou bien encore une ichnographie.

Néanmoins, en se démarquant des approches plus fonctionnelles et physiologiques de la biologie moléculaire[1], les auteurs prennent la peine de prévenir une éventuelle suggestion qui pourrait leur être faite, dès lors qu'elle a de fortes chances de naître en l'esprit de tout biologiste moléculaire ou de tout cytogénéticien en ce début des années 1970 :

« Par ailleurs, il n'existe pas de relation directe entre ce module et le réplicon, les longueurs d'ADN impliquées dans ces deux concepts étant mesurables respectivement en millimètres et en microns. »[2]

Il est donc hors de question d'apparenter voire d'identifier ce module avec le réplicon[3] qui se trouve être, en ce qui le concerne, une unité qui a été isolée pour des raisons d'abord fonctionnelles et non descriptives. Ce que veulent dire Essad et de Reffye, c'est que l'on ne peut identifier l'unité morphologique qu'ils ont mise en évidence avec l'unité fonctionnelle théorisée en biologie moléculaire. Et c'est finalement l'argument de la différence d'échelle, les millimètres par rapport aux microns, qui montre qu'une identification serait purement illusoire.

Assez paradoxalement, au premier abord, tous ces travaux originaux initiés par l'équipe d'Essad connaîtront par la suite très peu d'autres développements. Il nous est possible de trouver à cela plusieurs raisons dont la plus importante est le décès prématuré de Sadi Essad intervenu quelques années plus tard. Mais il faut bien évidemment rappeler que de son côté, de Reffye ne peut poursuivre ces travaux sur le *Lolium perenne* puisque, même s'il reste en contact avec Essad (qui l'encadre de loin pendant sa thèse de troisième cycle), il quitte le centre de Versailles et part, comme convenu, en Côte-d'Ivoire, juste après le DEA, afin de contribuer à l'amélioration de ces plantes arbustives bien différentes des plantes herbacées que sont les caféiers. De ce fait, ses propres travaux connaîtront inévitablement une certaine discontinuité entre le DEA et la thèse. Elle sera due, pour l'essentiel, au changement de l'objet d'étude mais aussi, comme nous le verrons, au contraste entre les différents moyens technologiques et humains mis à disposition à Versailles et en Afrique. Enfin, dans son entretien publié, Roger Cousin, qui a bien connu Essad parce qu'il était chercheur au Centre de Génétique et d'Amélioration des Plantes de Versailles depuis 1959, indique que personne à l'INRA ne voudra poursuivre exactement sur la lancée de ces travaux. Il semble cependant que Sadi Essad ait eu le temps de modifier la présentation de cette hypothèse du « module » en proposant un terme qui lui agréait davantage : celui de « nucléon »[4]. Il ne tenait pas en effet à conserver le style un peu trop « modéliste » et théorique de l'approche que de Reffye et lui-même avaient dans un premier temps adoptée. Même sous ce nouveau terme, l'hypothèse ne sera pas non plus reprise. Enfin, dans le fait que personne à l'INRA ne poursuive ces travaux de cytogénétique au niveau chromosomique il faut sans doute voir une des conséquences de ce que les historiens des sciences Jean-Paul Gaudillière et Michel Morange ont

[1] Surtout en France, à l'époque. De plus François Jacob, André Lwoff et Jacques Monod ont reçu le prix Nobel, quelques années auparavant, en 1965. Rappelons que Michel Morange, après Richard Burian et Jean Gayon, attribue cette primauté de la physiologie sur la morphologie dans la biologie française à la longue influence de la pensée de Claude Bernard. Voir [Morange, M., 1994], p. 212.
[2] [Reffye (de), Ph. et Essad, S., 1973], p. 2663.
[3] Rappelons brièvement que la théorie du réplicon a été proposée par Jacob, Brenner et Cuzin dans un article de 1963. Cette théorie est d'abord intervenue dans l'explication des phénomènes de division cellulaire chez les bactéries. Mais, par la suite, sa généralité a été relativement bien confirmée. Le réplicon y est présenté comme une unité de réplication autonome œuvrant sur la molécule d'ADN du chromosome et dont l'activité est régulée de manière complexe. Les cellules des organismes supérieurs (dites eucaryotes ou à noyau individualisé) disposent par exemple de plusieurs milliers de réplicons sur leurs molécules d'ADN. Pour ce rappel, nous nous sommes appuyé sur l'article « chromosome » de Denise Zyckler publié dans l'*Encylopaedia Universalis*, édition 1989 et CD-ROM 1995, Tome 5, p. 774a
[4] Voir [Cousin, R. et Poupardin, D., 1996], p. 68.

appelé la « molécularisation » de la biologie française et plus particulièrement de la génétique formelle, entre 1965 et 1972[1]. Les nouvelles technologies du génie génétique, appuyées notamment par le déploiement de la microscopie électronique, et intervenant pour leur part massivement au milieu des années 1970, vont également contribuer à marginaliser ce genre de travaux d'hybridation au niveau chromosomique puisque le contrôle génétique semblera de plus en plus pouvoir se faire au niveau moléculaire.

Quant à de Reffye, on le retrouve donc en poste en Côte-d'Ivoire, en ce début des années 1970. Le contexte de son institut d'accueil, l'IFCC, est bien particulier. Il est un des résultats du passé colonial de la France. Après la décolonisation, la mission de cet institut s'est résolument tournée vers le développement et vers la valorisation rationnelle des productions locales, cela dans l'intérêt de la France, bien sûr, mais aussi du pays d'accueil. En même temps, son implantation persistante dans des milieux et sous des climats bien différents de ceux de la métropole a fortement contribué à la diversification des problématiques agronomiques au-delà de ce qui aurait été possible sur le sol français. C'est dans ce contexte assez singulier donc, du point de vue de la recherche appliquée au niveau international, que prit naissance la simulation mixte.

La culture tropicale et la création de l'IFCC dans l'après-guerre

En 1971, lorsqu'il entre à la Division de Génétique de l'IFCC[2] (Institut Français du Café, du Cacao et autres plantes stimulantes), Philippe de Reffye est donc un jeune ingénieur agronome de l'ENSAT, titulaire d'un DEA de génétique et d'amélioration des plantes de la faculté d'Orsay. Ainsi, c'est en tant que généticien améliorateur qu'il fait ses premières armes dans la recherche ; et c'est à ce titre qu'on lui confie le poste en Côte-d'Ivoire. L'IFCC a alors treize ans d'existence. Afin de comprendre comment la recherche de de Reffye va précisément prendre forme et s'inscrire dans le cadre de cet organisme, il nous faut avant tout revenir sur les raisons qui ont présidé à la création de cet institut. Les orientations de recherche que va connaître de Reffye en sont directement issues.

L'IFCC a été créé à partir d'une structure d'abord interne à l'ORSTOM (Office pour la Recherche Scientifique et Technique en Outre-Mer) : le service « Café-Cacao- Thé ». Selon le directeur de l'ORSTOM de l'époque, Jean-Jacques Juglas, ancien ministre de la France d'Outre-Mer[3], la création de ce service avait été décidée au vu de « la place prépondérante du café et du cacao dans les exportations de plusieurs territoires »[4]. La caféiculture s'était en effet particulièrement développée en Afrique dans l'entre-deux-guerres, notamment grâce à la disponibilité nouvelle et à l'extension du café *Robusta*, variété de l'espèce *Coffea canephora*. Cette variété, plus robuste, était également plus facile à cultiver. Sous l'impulsion d'une politique favorable aux productions agricoles des colonies et attentive à réduire le déficit commercial de la France en matières premières tropicales, la culture du café avait été fortement valorisée, notamment par des exemptions de droits de douane[5]. Le cacao, pour sa part, constituait déjà une

[1] [Morange, M., 1994], pp. 221-223 et [Gaudillière, J.-P., 2002], chapitre 3.
[2] L'IFCC a été créé le 30 décembre 1957 et ses bureaux étaient installés 20, rue Monsieur, à Paris. Il est devenu l'IRCC en 1983, Institut de Recherche sur le Café, le Cacao et autres plantes stimulantes. Cet institut sera ensuite rattaché à d'autres pour former plus tard, en 1984, le CIRAD (Centre Internationale de Recherche en Agronomie pour le Développement).
[3] Sous la quatrième République, entre le 20 janvier 1955 et le 23 février 1955. Source : *Guide des sources de l'Histoire de l'Asie et de l'Océanie dans les archives françaises – Tome I : Archives*. Cette information nous a été directement communiquée par le Centre des Archives d'Outre-Mer d'Aix-en-Provence que nous remercions pour l'occasion.
[4] [Juglas, J.-J., 1957], p. 3.
[5] [Jagoret, P. et Descroix, F., 2002], p. 45.

des ressources principales de la Côte-d'Ivoire et du Cameroun. Mais une très forte hausse de la demande avait contribué à favoriser le développement des productions concurrentes dans d'autres pays, notamment au Ghana et en Amérique latine, alors même que l'accroissement de la production dans l'Union Française se tassait[1] au regard de l'augmentation de la production mondiale. De façon générale, dans l'après-guerre, la politique de la métropole a consisté à poursuivre le soutien aux cultures tropicales outre-mer, mais cette fois-ci davantage dans l'intention affichée que les régions concernées finissent par financer leur entretien et leur développement propres[2]. Toujours est-il que la métropole gardait un œil attentif sur les cours de ces matières premières produites dans les colonies. La culture du cacao ayant eu en outre à souffrir, au cours des années 1950, de très grosses fluctuations des cours, le gouvernement français avait réagi en créant d'abord un fonds national de régularisation des cours des produits d'outre-mer en février 1955, puis des « Caisses de stabilisation des prix », tout d'abord en Côte-d'Ivoire, puis successivement au Cameroun, au Gabon, au Togo et à Madagascar. Toutes ces créations étaient intervenues par décrets ministériels et coup sur coup à la fin de 1955 et au début de 1956[3].

L'ORSTOM pour sa part avait été créé en 1947. Il prenait la suite de l'ORSC (Office de la Recherche Scientifique Coloniale) créé par le gouvernement de Vichy en 1943. Dans son travail sur l'histoire du CNRS, Jean-François Picard a rappelé que cette notion juridique d'« office » était alors récente dans le droit français. Le premier « office » (Office national du tourisme) datait en effet de 1910. Ce type de structure, indique l'historien, dispose « d'une certaine autonomie financière, tout en restant attaché à une grande administration »[4], en l'occurrence le ministère des colonies. Or, rappelons que la création de l'ORSC intervint précisément à ce moment-là parce que le gouvernement de Laval, succédant en 1942 à celui de Darlan, était plus favorable que son prédécesseur à cette fragmentation de la recherche en offices autonomes, notamment par rapport au CNRS[5]. Par la suite, les gouvernements de la quatrième république conserveront cette structure d'office pour la recherche scientifique dans les colonies. Nous évoquons brièvement ici cette décision de principe pour l'autonomie parce qu'elle jouera un rôle important dans les pratiques de recherche que nous serons bientôt amené à exposer.

En ce qui concerne plus particulièrement l'engagement de l'ORSTOM dans la recherche appliquée, ou finalisée, d'après-guerre, des orientations volontaristes en faveur des productions agricoles coloniales se multiplièrent, cela pour plusieurs raisons. Tout d'abord, lorsque, dans les années 1950, les cours mondiaux du café en vinrent à augmenter considérablement, l'intérêt et les arguments de la politique de valorisation de la caféiculture prirent davantage de poids : la métropole y vit une grande opportunité à saisir, d'autant plus que les rendements des caféiers paraissaient encore tout à fait médiocres, donc susceptibles d'améliorations. En outre, la

---

[1] Pour une production mondiale de 848000 tonnes de fèves de cacao en 1955-1956, la Côte-d'Ivoire et le Cameroun en produisaient à eux-seuls 130000 tonnes. Mais leur progression (de 10000 tonnes) entre 1956 et 1957 accompagnait tout au plus la progression mondiale totale (avec un production prévue par le FAO à 900000 tonnes pour 1957) sans leur permettre d'accroître leur part de marché. Voir pour ces données [Café, Cacao, Thé, Vol. 1, n°1, 1957], pp. 41-42.

[2] En ce sens, l'idéologie de la « mise en valeur des colonies » ([Bonneuil, C., 1991], p. 40) telle qu'elle s'affichait après 1918 dans le souci louable de relever l'économie nationale n'était pas aussi prégnante après 1945.

[3] Voir le répertoire législatif publié dans [Café, Cacao, Thé, Vol. 1, n°1, 1957], pp. 52-53.

[4] [Picard, J.-F., 1990], p. 44.

[5] [Picard, J.-F., 1990], p. 80. Pour plus de précisions, voir également [Bonneuil, C., 1991], pp. 83-93. L'historien Christophe Bonneuil y explique le fait que placer la recherche coloniale sous la tutelle directe du ministère des colonies à travers une structure d'« office » revenait à lui imposer un axe plus technique, plus appliqué et finalisé. Au contraire, ce que promettait la tutelle du ministère de l'instruction publique, à travers le projet d'une section coloniale au CNRS (le CNRS était lui-même à cette époque sous la tutelle de l'instruction publique), était une orientation clairement plus fondamentale pour la recherche dans les colonies [Bonneuil, C., 1991], p. 87.

consommation mondiale en cacao mais aussi et surtout en café avait connu une forte hausse. La demande en café fin, par exemple, augmentait très sensiblement. Le discours affiché de l'ORSTOM était alors le suivant : « Pendant longtemps encore les produits industriels ne tiendront qu'une place très limitée dans les exportations des Territoires d'Outre-Mer […] les produits agricoles constitueront encore, au moins en valeur, pendant bien des années, le gros des exportations. »[1] La recherche agronomique devait donc y tenir une place plus que jamais prépondérante, et pour longtemps encore.

Le service « Café-Cacao-Thé »

C'est dans ce cadre-là que la création du service « Café-Cacao-Thé » de l'ORSTOM est intervenue, fin 1955. Dès le départ, ce service avait été conçu pour favoriser le déploiement rationnel et systématique de programmes d'amélioration, notamment par les méthodes génétiques, du rendement des plantes cultivées comme le café, le cacao ou le thé dans ce qu'on appelait alors (jusqu'en 1958) l'« Union Française » (AEF, AOF, Madagascar et Nouvelle Calédonie)[2]. Comme l'ont montré les travaux de Christophe Bonneuil, ce mouvement volontariste et centralisé de valorisation, de rationalisation et d'intensification des productions des colonies françaises n'était pas nouveau puisqu'on doit le faire remonter aux années qui ont immédiatement suivi la première guerre mondiale[3]. Mais, dans les années 1950, au vu des rendements obtenus, il était de nouveau très clair que les cultures tropicales souffraient de la comparaison avec les progrès spectaculaires que la sélection génétique avaient pu apporter entre-temps à l'agronomie rationnelle de métropole et des pays tempérés en général. Ces avancées remontaient déjà aux premières années de l'immédiate après-guerre lorsque certains hybrides créés aux Etats-Unis firent leur apparition en France. Ce fut notamment le cas en 1946 pour les hybrides du maïs[4]. Alors même que le café par exemple était déjà considéré comme un produit stratégique[5], l'amélioration du rendement des caféiers avait été en revanche longtemps délaissée. Tout au moins était-elle abandonnée à l'initiative individuelle des jardins d'essai : des améliorations ponctuelles avaient été obtenues, mais souvent inefficaces, car il ne servait à rien d'isoler une souche à fort rendement si, par ailleurs, elle était fragile face aux maladies ou à la sécheresse. Il apparaissait ainsi de plus en plus qu'il fallait pouvoir maîtriser ou contrôler en même temps de nombreux facteurs, cela de façon rigoureuse et sur de nombreuses années. Or, selon un rapport initial de René Coste, qui fut le premier directeur du service « Café-Cacao-Thé », les membres de ce tout nouveau service s'accordaient sur le fait que ce genre de pratique n'était plus guère accessible à l'initiative individuelle et irraisonnée[6]. En cette fin des années 1950, les agronomes français avaient donc plus que jamais fait valoir l'idée que, dans le cas des cultures tropicales françaises, la complexité de leur discipline exigeait une organisation uniquement dédiée à l'amélioration des plantes, avec un fort versant génétique et biométrique *a priori*[7]. Si l'on voulait

[1] [Juglas, J.-J., 1957], p. 3.
[2] Voir sur ce point [Coste, R., 1958].
[3] Voir [Bonneuil, C., 1991], chapitre I : pp. 21-57.
[4] En quelques années, les rendements crurent d'au moins un tiers pour le maïs et triplèrent pour le blé. Pour ces chiffres, voir [Coste, R., 1958], p. 59.
[5] [Jagoret, P. et Descroix, F., 2002], p. 45.
[6] [Coste, R., 1958].
[7] Même si l'IFCC prévoyait aussi l'amélioration des rendements par la maîtrise des conditions écologiques et par l'ajout de substances de croissance ou engrais, comme en témoigne abondamment la revue de l'Institut (*Café, Cacao, Thé*) qui a paru de 1957 à 1994. Notons d'ailleurs que l'existence de cette revue a précédé d'un an celle de l'IFCC. En effet, elle a d'abord été créée puis transitoirement soutenue par l'ORSTOM et son service « Café-Cacao-Thé ».

intensifier la caféiculture, il fallait mettre en œuvre des programmes centralisés de suivi, de traitement et d'évaluation très stricts[1]. L'heure n'en était plus à la sélection variétale improvisée.

La centralisation n'a pas été un des derniers arguments ni une des dernières motivations pour la création d'une telle structure. Elle était déjà pensée de longue date au niveau ministériel. On en a la preuve si l'on songe que, dès 1953, par un décret en date du 17 novembre, toutes les attributions exercées dans les territoires d'outre-mer par les divers organismes de recherches agronomiques (dont les deux Centres de Recherches Agronomiques de l'Afrique Occidentale Française de Bingerville en Côte-d'Ivoire et de N'Kolbisson au Cameroun) avaient auparavant été transférées à l'ORSTOM[2]. Pour toutes ces raisons, en 1955, l'ORSTOM décidait de créer ce service spécial centralisant les organismes qui étaient dédiés à l'amélioration du café, du cacao et du thé. Parmi ses premières actions ont figuré la création en Côte-d'Ivoire d'un important centre de recherches caféières et cacaoyères[3]. Ainsi, ce qui, à Bingerville, avait d'abord été un « jardin d'essai » à partir de 1900, puis une « station expérimentale » dédiée à la sélection variétale pour le caféier et le palmier à partir de 1929[4], devenait un centre de recherches particulièrement spécialisé dans l'amélioration génétique du caféier et du cacaoyer. Cette notion de « station expérimentale » venait bien entendu de l'exemple britannique et notamment de la station de Rothamsted qui vit les premiers travaux en agronomie de R. A. Fisher.

Une « large autonomie locale »

Dans l'esprit de ses fondateurs, c'est assez paradoxalement grâce au pouvoir centralisateur nouvellement accru de sa tutelle nationale directe (l'ORSTOM) que le service « Café-Cacao-Thé » devait jouir d'une « large autonomie locale ». En 1957, dans le premier numéro de la revue *Café, Cacao, Thé*, le directeur de l'ORSTOM, Jean-Jacques Juglas, s'exprime en effet ainsi :

« Deux caractères distinguent [le service spécialisé Café-Cacao-Thé »] : tout d'abord large autonomie locale, son activité sur place étant orientée et contrôlée par des Conseils Techniques auxquels participent tous ceux, planteurs, négociants-exportateurs, services techniques qui dans les territoires sont intéressés à ces trois produits. En second lieu, liaison étroite par le Conseil de Spécialité d'une part avec la Fédération Nationale des producteurs de Café et de Cacao, d'autre part avec les Industriels, torréfacteurs et chocolatiers, cependant qu'à cet échelon supérieur les Conseils Techniques locaux détachent des délégués. »[5]

---

[1] Donc en continuité avec les programmes de protection et de stabilisation des cours mis en place par les gouvernements français. Il y a là, comme on le voit, une telle imbrication des motifs scientifiques, techniques et de gestion, de plus accentuée par l'entreprise centralisatrice de contrôle et de régulation, que les ingénieurs agronomes vont définitivement détrôner les naturalistes dans la mise en valeur des colonies. Sur le conflit initial entre ces deux corporations et leurs institutions, voir [Bonneuil, C., 1991], pp. 41 et 45.

[2] Evoquant cette centralisation, René Coste, chef du service « Café-Cacao-Thé » à sa création, écrivait dans le premier numéro de la revue *Café, Cacao, Thé* de janvier-avril 1957 : « Cette importante et judicieuse mesure permettra, avec une direction centralisée, une répartition rationnelle des activités, un meilleur contrôle de l'exécution des programmes et une coordination des efforts, difficiles à réaliser jusqu'alors avec des organismes dispersés dans de lointains territoires et placés sous la dépendance de diverses autorités administratives. Cela permettra aussi, et c'est un des aspects les plus réconfortants de cette réforme, grâce au Fonds commun de la recherche scientifique et technique d'outre-mer, d'assurer le financement régulier de toutes les opérations entreprises », [Café, Cacao, Thé, vol. 1, n°1, p. 9].

[3] La Station Expérimentale d'Abengourou en Côte-d'Ivoire, située plus au nord du pays et spécialisée dans l'amélioration du cacao, existait cependant depuis 1947.

[4] Pour les dates, voir [Bonneuil, C., 1991], p. 105.

[5] [Juglas, J.-J., 1957], p. 3.

C'est donc cette structure dotée de conseils techniques locaux interdisciplinaires qui devait assurer l'adaptation des problématiques de recherche aux conditions locales. Avec ce fonctionnement, il était statutairement entendu que la conception de solutions scientifiques et techniques devait se trouver fortement en prise avec les conditions locales de production tant économiques que climatologiques : il n'y a pas d'amélioration des plantes en soi mais toujours pour un usage donné et dans un contexte donné. La structure administrative de la recherche agronomique, plus précisément des instances locales auprès desquelles les ingénieurs et techniciens devaient rendre des comptes, était en quelque sorte calquée sur la nécessaire diversité et interdisciplinarité des approches d'amélioration des plantes et des rendements. C'est à ce besoin que répondait le premier échelon des conseils techniques. Mais, comme l'indiquent les propos précédents, un deuxième niveau de fonctionnement veillait de surcroît à la communication plus globale de l'information et des ressources propres aux conseils locaux. Ces conseils techniques ont donc eux-mêmes à rendre des comptes à un niveau national et selon leur spécialité.

La perspective du marché commun : accroître la compétitivité des produits nationaux

Par ailleurs, il se trouva que les agronomes purent être entendus et exaucés justement en 1957 parce qu'un argument nouveau, d'ordre politique celui-ci, pesait tout aussi considérablement en leur faveur : l'entrée de la France dans le marché commun. En 1958, René Coste, devenu entre-temps le premier directeur général de l'IFCC, s'exprimait en effet ainsi :

« [L'importance d'une production de qualité] est encore renforcée avec la perspective de l'entrée, très prochaine, de l'Union Française dans le marché commun, car tout devra être mis en œuvre par les exploitants, dans les années de transition, pour abaisser leur prix de revient à des niveaux compétitifs sur les grands marchés des partenaires européens. »[1]

La perspective raisonnable de pouvoir augmenter, grâce à une recherche scientifique soutenue, le rendement d'une matière première dont les cours mondiaux étaient en même temps élevés, doublée du nouvel enjeu européen a donc incité à la création de l'IFCC comme entité autonome, ainsi qu'à la définition précise de sa mission : l'amélioration des plantes pour l'agronomie et le développement, en particulier celle du café. Un des objectifs affichés était bien évidemment de faire acheter par les pays du marché commun davantage de café venant des colonies françaises, aux dépens des cafés sud-américains, entre autres.

En outre, il y avait un grand déficit de connaissance concernant les variétés de cafés cultivées en Afrique. Car les quelques connaissances agronomiques que l'on possédait sur le café étaient pour l'essentiel dues à des agronomes néerlandais de Java, Sumatra et à des agronomes brésiliens. Et elles concernaient avant tout les cafés Arabica et non la variété Robusta qui se prête pourtant mieux à l'environnement de la Côte-d'Ivoire. Le programme d'amélioration des plantes tropicales dans les colonies françaises présentait donc tous les éléments lui permettant de passer *a priori* pour un défrichement initial prometteur et dont on pouvait espérer de rapides retombées scientifiques, techniques et économiques.

[1] [Coste, R., 1958], p. 67.

L'orientation de la recherche génétique à l'IFCC : l'amélioration des plantes

Il y a de très nombreuses manières d'améliorer le rendement d'une plante cultivée. D'un point de vue général, aucune d'entre elles n'est exclusive des autres, même si ponctuellement les solutions préconisées peuvent se contrarier : soit l'on tente de jouer sur l'écologie de la plante en lui trouvant un environnement, une altitude favorable ou un ensoleillement optimal ; soit on tente d'influer sur sa production, au moyen d'une approche physiologique intervenant directement sur l'assimilation en nutriments, l'apport artificiel de différentes substances : eau, engrais et produits chimiques divers ; soit on tente de la protéger des parasites ou des maladies par le recours à d'autres sortes de produits chimiques ; soit l'on développe une pratique culturale adaptée de coupe, de taille, d'élagage ou de recépage ; soit enfin on tente d'intervenir en amont, et plus directement, sur les déterminants génétiques de la plante. C'est là que l'on trouve les pratiques de sélection, de croisement et d'hybridation propres à l'agronomie.

Ainsi, dans cette dernière perspective, au lieu de privilégier l'adaptation de l'environnement à la plante, on travaille, au contraire, à créer des variétés nouvelles, génétiquement mieux adaptées à l'environnement existant et aux conduites culturales que l'on sait mener avec les moyens techniques et humains dont on dispose. Bien entendu, ces pratiques de sélection artificielle sont aussi anciennes que la culture des plantes ou l'élevage des animaux. Mais ce sont elles qui, après-guerre et avec les récents apports de la génétique à l'agronomie, seront qualifiées plus spécifiquement de techniques d'« amélioration des plantes » aux côtés de celles qui visent à améliorer le rendement de plantes déjà existantes en opérant sur leur milieu immédiat. Comme l'indiquent les publications, à la suite de la création volontariste du service spécialisé de l'ORSTOM qui deviendra l'IFCC, toutes ces sortes de pratiques d'amélioration que nous avons énumérées ont été tentées sur la caféiculture, notamment en Côte d'Ivoire, avec des résultats assez vite encourageants dans de nombreux domaines. Mais, pour ce qui concerne la production de café ivoirien, il n'aurait servi à rien de ne travailler qu'à augmenter le rendement car le type de café obtenu initialement à partir des espèces autochtones (dite « spontanées » par les agronomes) de la Côte-d'Ivoire n'était pas adapté à la demande des consommateurs. C'est la raison pour laquelle, dès les premières années de l'IFCC, l'approche de type « amélioration des plantes » au sens strict a été fortement favorisée dans le cas du café ivoirien.

À partir de 1961, J. Capot, d'abord ingénieur agronome puis chef de la division de génétique, a donc mené, avec son équipe de techniciens et d'ingénieurs, des travaux de sélection génétique sur le café de façon à améliorer la qualité de l'espèce ivoirienne spontanée : le *Coffea canephora* dont le Robusta est une variété. Il est bien connu que le café Arabica ou d'Arabie possède une meilleure saveur. Il est moins amer que le Robusta. Cependant le Robusta a l'avantage d'avoir plus de corps mais surtout celui d'être plus facilement cultivable en Côte-d'Ivoire, c'est-à-dire à basse altitude (pas plus de 300 m) et sous un climat tropical régulier. Or, comme ces deux derniers facteurs culturaux ne sont pas techniquement modifiables à loisir, on voit qu'il paraît préférable d'opter ici pour une approche « amélioration de la plante ». Afin d'introduire le patrimoine héréditaire de l'Arabica dans le Robusta en retirant les avantages des deux espèces, J. Capot et son équipe de l'IFCC tentent d'hybrider les deux[1]. À partir de 1965, ils commencent à obtenir des hybrides d'Arabica et de Robusta qu'ils vont mettre sept années à

[1] [Capot, J., Dupautex, B. et Durandeau, A., 1968], p. 114.

stabiliser et à évaluer correctement[1], jusqu'à leur publication majeure de 1972 dans la revue *Café, Cacao, Thé*. C'est dans cette publication que J. Capot propose l'appellation « Arabusta »[2] pour désigner l'hybride ainsi conçu. Cette appellation fera date et sera adoptée par ses collègues, dont de Reffye.

[1] Ce travail d'hybridation interspécifique n'a pas été trivial car il a fallu d'abord doubler artificiellement le nombre de chromosomes du Robusta diploïdes (1 répétition des chromosomes : 2n = 22) pour qu'ils puissent s'apparier à ceux de l'Arabica tétraploïdes (2 répétitions des chromosomes : 2n=44). La polyploïdie est très fréquente chez les végétaux.

[2] « Ce vocable rendant bien compte de la dualité de leur constitution », [Capot, J., 1972), p. 4. Malgré leur intérêt, nous ne rendrons pas compte ici de ces recherches et de leur contexte dans le détail puisqu'elles ne se réfèrent pas directement à la problématique de la modélisation et à son évolution. Cependant, il nous faut les évoquer car ce sont elles qui mettent à disposition des agronomes un nouveau matériel d'étude qui va en retour les inciter à poser au végétal des questions précises nouvelles en vue d'une pratique de sélection variétale mieux armée. Elles contribuent donc bien à dessiner le contexte scientifique et technique des travaux de modélisation qui suivront.

CHAPITRE 22 – La probabilité de fructification comme caractère génétique (1971-1975)

Lorsque Philippe de Reffye rejoint l'IFCC de Côte-d'Ivoire en 1971, il trouve donc un matériel génétique déjà bien renouvelé, affiné et diversifié. L'équipe de Capot a déterminé de façon incontestée certains des avantages qu'il y avait à produire de l'Arabusta. Les parasites et ravageurs de ce « nouveau matériel végétal » semblent bien circonscrits[1].

Pour sa part, de Reffye passe cette première année (1971-1972) dans une station de brousse. Son rôle y est d'observer avant tout la croissance des caféiers. Commence une période assez calme pendant laquelle il vit au milieu des plantes et observe quotidiennement la fructification et la croissance de caféiers. L'heure est à la comparaison des fertilités respectives des différentes variétés désormais produites. Puisqu'il est coopérant en poste en brousse, donc assez isolé, l'IFCC lui laisse d'abord une assez grande liberté et une très grande initiative pour ses travaux. C'est ce sentiment de liberté et cette confiance qu'il apprécie et dont il sait tirer parti, même si les moyens sont relativement limités dans les conditions d'isolement qui sont les siennes. En outre, les chercheurs confirmés qui l'entourent attendent simplement de lui qu'il sache ou, tout au moins, qu'il ne craigne pas de décider par lui-même dans quelle direction il doit mener ses propres recherches.

Cependant, à terme, le but des observations qu'il mène à l'IFCC existe bien : au vu de la diversité des phénotypes désormais obtenus par les généticiens améliorateurs, il s'agit d'abord de trouver un moyen de déterminer le phénotype qui maximise le rendement. Dans ce domaine, un des objectifs plus précis est d'améliorer la productivité des hybrides Arabusta auparavant conçus par l'équipe de Capot. À l'époque, cette productivité reste en effet assez systématiquement inférieure à celle des Robusta. Le contrat des améliorateurs de l'IFCC n'est donc qu'à moitié rempli. Il est encore nécessaire de pratiquer une politique de sélection des géniteurs tétraploïdes intervenant dans la conception des Arabusta de sorte que l'on obtienne au final des caféiers à la fois plus adaptés et plus productifs. Mais cette politique ne paraît pas aisée à définir *a priori* dès lors qu'aucune caractéristique morphologique simple n'est susceptible à elle seule de servir de marqueur pour le rendement à venir. « Il ne suffisait pas de peser les récoltes pour comparer les productivités »[2], écrira-t-il plus tard. Il faut donc considérer un ensemble de caractéristiques morphologiques et voir comment leurs diverses combinaisons sont corrélées avec le rendement. L'approche suggérée sera donc d'abord d'inspiration biométrique puisqu'il s'agit de prendre en compte de nombreux facteurs et leurs co-évolutions. En s'appuyant sur ses connaissances en statistiques et sur les ouvrages disponibles à l'IFCC, c'est bien en premier lieu dans cette perspective que de Reffye choisit de se placer pour aborder la question du rendement des caféiers.

Transférer un peu d'économétrie dans la biométrie : le premier article de 1974

Cependant, de Reffye fait tout de suite le choix de traduire ce problème dans les termes d'une recherche d'un optimum sous contraintes. Les méthodes classiques de la biométrie, on le

[1] [Capot, J., 1972], p. 15.
[2] [Reffye (de), Ph. *et al.*, 1996], p. 3.

sait autour de lui, ne sont de toute façon pas très satisfaisantes sur le terrain ivoirien : elles échouent à expliquer certains résultats empiriques surprenants. Ainsi, pour un clone donné de caféier, l'ombrage peut donner des résultats contradictoires d'une année sur l'autre[1]. Pour de Reffye, il faut d'abord se donner les moyens permettant de rechercher ce qu'il appelle l'« optimum en amélioration des plantes »[2]. L'expression qu'il choisit est délibérément révélatrice de la première approche des questions de rendement qui a été la sienne. Dans son premier article de 1974, c'est en effet tout d'abord en référence à une méthode et à une terminologie empruntées explicitement à l'économétrie et non seulement à la biométrie qu'il propose de rechercher le meilleur phénotype pour le rendement en café.

Or, à quoi peut-on attribuer le choix de cette première perspective ? Certes avant tout au type de problème posé : on cherche à optimiser une caractéristique particulière du caféier, sa production en fruits, compte tenu de la variabilité morphologique limitée dont on dispose mais qu'il faut néanmoins considérer. Mais pourquoi ne pas recourir aux méthodes classiques de la biométrie ? C'est que les « modèles descriptifs », selon l'expression de de Reffye, semblent inadaptés si, comme c'est le cas ici, on ne cherche pas seulement à étudier la variabilité d'une population par analyse de données en composantes principales[3], mais à rechercher un optimum qui peut être encore non réalisé par les données. C'est que l'on veut un modèle qui permette de *décider* d'une orientation culturale optimale pour le rendement. Pour cette même raison, les modèles de régressions multiples, nommés « prévisionnels »[4] par de Reffye, tout en autorisant certes des extrapolations à partir des données, ne permettent pas pour leur part de désigner clairement un optimum hypothétique. De Reffye se plonge alors dans des ouvrages d'économétrie puisque ce genre de problème semble bien plus souvent s'y poser et y être déjà résolus. C'est ainsi qu'il se familiarise avec les méthodes de programmation linéaire et dynamique[5] utilisées en économie et déjà bien développées depuis la seconde guerre mondiale. Ces lectures diverses, à visée pragmatique, donc faites sans grands *a priori* théoriques ou disciplinaires au vu du faible encadrement académique dont il dispose en Afrique, le conduisent donc d'abord à traduire son problème agronomique en termes de programmation linéaire au sens de l'économétrie et de la recherche opérationnelle. Voici ce qu'il propose :

---

[1] [Reffye (de), Ph. *et al*., 1996], p. 3.

[2] [Reffye, (de), Ph., 1974a].

[3] Il s'agit d'une analyse de données sur des variables numériques ou tout au moins scalées (c'est-à-dire ordonnées entre elles avec des distances relatives constantes). Comme l'analyse factorielle des correspondances qui, elle, se concentre sur des variables nominales ou qualitatives, l'analyse en composantes principales consiste à rechercher les axes d'inertie du nuage de points que forment les données et à les exprimer en fonction de ces nouveaux axes ou « composantes principales ». Voir [Lagarde (de), J., 1995], pp. 101-109.

[4] Dans les ouvrages d'analyse de données, ils sont également appelés « modèles explicatifs » par contraste avec les modèles d'analyses en composantes principales souvent dits « descriptifs », dans la mesure où ils sont un cas particulier d'analyse en composantes principales. Il s'agit du cas où il n'y a qu'une seule variable à expliquer en fonction de toutes les autres. Il est intéressant de noter que le modèle est considéré comme explicatif ou tout au moins prévisionnel à partir du moment où, comme dans une équation mathématique explicite ($y = f(x)$), une variable est manifestement privilégiée en étant exprimée comme combinaison linéaire de toutes les autres.

[5] Dans la page 32 de son article « programmation mathématique » de l'*Encyclopaedia Universalis*, Tome 19, édition 1989, CD-ROM 1995, le mathématicien Ivar Ekeland écrit : « La programmation mathématique consiste à chercher, parmi tous les points x vérifiant certaines conditions du type $g_j(x) \leq 0$, $1 \leq j \leq J$ (contraintes) et $h_k(x) = 0$, $1 \leq k \leq K$ (liaisons) celui ou ceux qui rendent minimal (ou maximal, suivant le cas) un certain critère f (x) qui sera interprété comme un gain dans le premier cas (et comme un coût dans le second). Quand la variable x est de dimension finie, et que ses composantes ($x_1, \ldots, x_n$) ne peuvent prendre que des valeurs entières, on parle de programmation en nombres entiers ; quand elle est continue, c'est-à-dire quand x décrit $\mathbb{R}^n$ ou un autre espace vectoriel, on parle de programmation linéaire [« les contraintes sont des fonctions linéaires des variables x_i » et le « critère est lui-même linéaire », précise-t-il plus bas], convexe ou non convexe suivant les propriétés de fonctions f, g_j et h_k. Enfin, la variable x peut avoir une structure, c'est-à-dire se présenter comme une fonction d'autres variables plus primitives, notamment le temps ; on emploie alors la programmation dynamique. »

« En effet, lorsque dans une population, une liaison entre la variabilité phénotypique et un critère de sélection (comme le rendement) est constaté, il est intéressant de se demander quel est le phénotype optimum qui maximise ce critère, compte tenu de la variabilité limitée dont on dispose et des corrélations qui existent entre les caractères morphologiques. »[1]

La « variabilité limitée » et les « corrélations » qui existent entre les caractères morphologiques du caféier vont donc constituer les « contraintes » du programme linéaire de production du caféier, au sens de l'économètre. Tandis que le rendement exprimé par un « modèle linéaire »[2] fonction des caractères va constituer le « critère » à maximiser. Or il nous faut remarquer que ce transfert de méthode de la recherche opérationnelle à l'agronomie est possible à de Reffye d'une part parce que tous les caractères morphologiques qu'il considère sont de nature numérique (il s'agit d'une analyse en composantes principales et non d'une analyse factorielle), d'autre part parce qu'il lui semble admissible de considérer que le rendement de la plante peut s'exprimer par une fonction linéaire de ses caractères. Ceux-là sont au nombre de cinq et sont répartis en deux groupes. Le premier groupe rassemble les caractères de la feuille du caféier : 1 - le profil de la feuille (longueur sur largeur) ; 2 – la dimension de la feuille (la racine carrée de sa longueur fois sa largeur) ; 3 – la densité foliaire (le poids sur la surface de la feuille). Le deuxième groupe rassemble deux caractères du rameau : 4 - l'épaisseur du rameau ; 5 – le nombre de nœuds portés par le rameau. La façon dont de Reffye considère le « rendement » et la productivité du caféier est donc identique à celle que les économistes adoptent lorsqu'ils sont face à des problèmes d'optimum de production des entreprises. Là aussi, il s'agit bien de chercher un optimum de *production*.

Dans ce premier modèle, la plante est donc considérée comme l'analogue d'une usine. Puisque, dans une perspective agronomique et, plus précisément, d'amélioration de la plante, il s'agit là aussi de décider d'une politique (de sélectionner une variété), le modèle d'analyse et de décision qui valait d'abord pour l'artefact (l'usine ou la production humaine) semble pouvoir être transféré à l'objet « naturel »[3] qu'est la plante.

Des résultats en demi-teinte

De Reffye procède donc dans un premier temps à une analyse en composante principale du nuage de points à cinq dimensions, cela pour plusieurs familles d'Arabusta. Le premier résultat numérique tend à montrer que les caractères 1, 2, 3 et 5 sont très corrélés entre eux alors que le caractère 4 (l'épaisseur du rameau) varie de façon indépendante[4]. La croissance en épaisseur paraît donc décorrélée de la croissance architecturale (ici croissance foliaire et en nombre d'entre-nœuds). Par la suite, de Reffye considère les données projetées sur les composantes principales et exprime le rendement dans ce nouveau référentiel :

« Pour chaque individu, on dispose du rendement cumulé en cerises [fruits du caféier] sur deux années de récolte. L'estimation du rendement sera effectuée à l'aide de la régression

[1] [Reffye, (de), Ph., 1974a], p. 167.
[2] [Reffye, (de), Ph., 1974a], p. 169.
[3] Cette « naturalité » de la plante est justement contestable dès lors que, par la génétique, on « fait » des plantes nouvelles. Devenant par là manifestement et plus que jamais un artefact humain, et perçue comme telle, la plante peut se voir plus aisément transférer les méthodes d'ingénieur auparavant appliquées à la gestion des entreprises humaines.
[4] [Reffye, (de), Ph., 1974a], p. 171.

linéaire : Si = Yi . A + Ei, où A est le vecteur régression, Si le rendement de l'arbre i, Yi le point observation à cinq composantes de cet arbre, Ei étant l'erreur résiduelle. »[1]

De Reffye parvient ce faisant à trouver un bon accord entre ce que le modèle de rendement par régression prévoit, à partir des cinq caractères morphologiques choisis, et les mesures de terrain. Mais les chiffres indiquent également qu'il n'y a pas de corrélation entre le vecteur régression du rendement et les composantes principales : le rendement ne s'exprime donc pas simplement. De plus, les clones ou familles de caféiers présentent une grande variabilité intrinsèque quant au rendement. L'observation faite par ailleurs est confirmée. Donc, si les caractères rendent compte du rendement, ils sont, pour leur part, mal maîtrisables par le sélectionneur. Toutefois, lorsque l'on exprime le vecteur régression du rendement en fonction des variables initiales (les cinq caractères numériques du caféier), la composante la plus significative se trouve être la cinquième : le nombre de nœuds par rameau. Les caractères foliaires « n'ont pas d'importance en ce qui concerne le rendement »[2] et l'épaisseur du rameau joue, par sa part, de façon modérée, même si les gros rameaux sont en général plus productifs que les rameaux fins. Pour la production en cerises du caféier, se confirme l'idée que des relations allométriques fonctionnelles et mathématiquement simples sont exclues.

En outre, parmi les résultats, figure la constatation *a posteriori* de l'importance de la casse des rameaux trop ramifiés : « ils se cassent au niveau de leur attache, parce qu'ils sont trop lourds »[3]. Dans ce cas, « la partie lésée des tissus vasculaires appauvrit alors le ravitaillement du rameau en sève »[4]. Or, c'est bien là reconnaître que des phénomènes non-linéaires peuvent interférer de façon significative dans la production en café et qu'ils viennent limiter la pertinence de l'approche par modèles linéaires, quand bien même ces derniers seraient multifactoriels. En conséquence, et cela apparaîtra décisif pour la suite, de Reffye préconise qu'à l'avenir, on prenne également en compte le « port » de l'arbre, dès lors qu'un certain nombre de « bons producteurs ont tendance à se coucher et sont inaptes à la culture industrielle »[5].

De Reffye calcule alors ce qu'il appelle le « rendement théorique », c'est-à-dire le rendement que l'on peut espérer. Les valeurs des caractères morphologiques qui correspondent à cet optimum se trouvent être non réalisées dans les arbres mesurés. Elles sont néanmoins proches de celles que présente la famille dite « 1300 » pour laquelle on peut espérer un gain de 33% en rendement. Ce qui donnerait 17kg de café par pied. La grande différence entre l'optimum de cette famille et ce qu'elle réalise déjà tient à ce qu'elle développe en moyenne 3,5 nœuds par rameau au lieu de 3 nœuds pour l'optimum. Or, c'est bien ce caractère du nombre de nœuds qui semble décisif, comme nous l'avons dit. Tirant les conclusions de cette première approche économétrique pour la recherche d'un optimum, de Reffye incite donc les sélectionneurs à se pencher notamment sur ce dernier aspect de la plante. La politique de sélection qu'il préconise au

[1] [Reffye, (de), Ph., 1974a], p. 173. La technique de recherche d'optimum de production du nuage de points consiste d'abord à trouver l'équation de l'ellipsoïde qui le borne et, ensuite, par une méthode de type multiplicateur de Lagrange, à exprimer la maximisation du module du vecteur S des Si comme la maximisation de la distance euclidienne de l'hyperplan caractéristique de ce vecteur à l'origine. Lorsque l'hyperplan est tangent à l'ellipsoïde, tout autre hyperplan définissant un rendement moindre, le point de contact définit bien l'optimum. Or, cet optimum peut, sans ambiguïté, être exprimé mathématiquement. C'est ce qu'a fait auparavant de Reffye, à la page 169 de son article.
[2] [Reffye, (de), Ph., 1974a], p. 174.
[3] [Reffye, (de), Ph., 1974a], p. 174.
[4] [Reffye, (de), Ph., 1974a], p. 174.
[5] [Reffye, (de), Ph., 1974a], p. 176. Cette suggestion sera une de celles qui justifieront l'approche modélisatrice de la thèse de 1979.

final reste toutefois très vague et peu spécifique dans la mesure où cette approche n'est finalement pas parvenue à exprimer simplement le rendement :

« Dans un premier temps, on essaiera de se rapprocher de l'optimum par croisement, en jouant sur la variation interfamille, car la position de la famille détermine son rendement moyen.

Dans un deuxième temps, on essaiera d'obtenir le maximum de graines en jouant sur la variation intrafamille vu l'hétérogénéité du rendement entre clones d'une même F1 [famille de géniteurs tétraploïdes]. »[1]

Or, même dans ce cadre-là, il reste à prendre en compte deux phénomènes qui sont encore limitants et qui n'ont pas été considérés : la faible adaptation au climat ivoirien transmise par les Arabica aux Arabusta (se traduisant par un avortement fréquent de la floraison), les mauvaises méioses des tétraploïdes parents et le mauvais appariement entre chromosomes Robusta et Arabica causant de fort taux de *caracolis* (une seule graine par cerise). Le rappel de l'existence de ces deux types de phénomènes et leur non prise en compte attestent bien du fait que l'approche par recherche d'optimum reste assez illusoire même si l'on parvient toujours à trouver par le calcul un modèle de régression : aucune connaissance précise ni aucune prise nouvelle sur les phénomènes n'est ce faisant réellement donnée au sélectionneur. Le deuxième phénomène, en particulier, appelle une meilleure connaissance des facteurs contrôlant la fertilité, au plus près de la fleur. Ce sera précisément l'objectif du second travail de modélisation de de Reffye à l'IFCC.

Ce travail de recherche directe d'un optimum global sera délaissé par de Reffye. Il ne sera pratiquement jamais cité dans ses travaux ultérieurs. Cette première approche constitue donc une sorte d'impasse. Mais, comme nous le verrons par la suite, plusieurs leçons utiles vont néanmoins en être tirées. La première, que de Reffye a indéniablement retenue, peut sans doute se formuler de cette façon : alors même que cela pourrait sembler une solution élégante ou brillante, il est illusoire de formaliser immédiatement des phénomènes vivants complexes à un niveau global et seulement fonctionnel.

De la fonction à la structure

À la différence du premier article sur la « recherche de l'optimum » dont il a été question précédemment, c'est ce deuxième article de 1974 qui présentera en revanche à lui seul l'essentiel du contenu de la thèse de troisième cycle soutenue en 1975. L'approche par programme linéaire de type recherche opérationnelle y est manifestement abandonnée. De Reffye renonce en effet à l'approche globale par le rendement. Conformément à la dernière partie du programme qu'il fixait à l'issue de l'article précédent, il décide de sérier les phénomènes successifs menant à la fructification. Et il rentre cette fois-ci dans le détail des événements de la fructification. Il essaie ainsi de repérer et de contrôler les critères précis d'une bonne fructification des caféiers[2]. Or, une des leçons voire sanctions majeures de ses travaux antérieurs (non cités dans la thèse de 1975) est qu'une série de phénomènes non modélisables linéairement interviennent dans le rendement. C'est la raison pour laquelle il lui faut admettre qu'un modèle de régression linéaire offre peu de prises sur les critères de sélection. À partir de ce moment-là, la recherche qu'il conduit est entreprise dans un but pragmatique et agronomique plus clair à ses yeux : connaître et maîtriser

[1] [Reffye, (de), Ph., 1974a], p. 176.
[2] Selon le titre de [Reffye, (de), Ph., 1974b], p. 237.

précisément cette fructification par une reconstitution plus fine du scénario qui mène aux fruits, au détriment il est vrai de l'élégance et de la simplicité de la solution mathématique[1].

De façon générale, en ce début des années 1970, l'amélioration des rendements des plantes est considérée comme une tâche particulièrement difficile : « aléatoire, laborieuse, longue et coûteuse car le jugement n'est qu'*a posteriori* sur le résultat global »[2]. D'où l'hégémonie des approches informationnelles par analyses statistiques et, en particulier, par analyses de variance, en ce domaine. Selon les ingénieurs agronomes, il serait en fait déjà souhaitable de mettre en évidence des marqueurs précoces et rapides du rendement des plantes, cela afin de pouvoir au plus vite le prédire, mais aussi afin de pouvoir rendre à même de choisir les géniteurs les plus intéressants parmi les clones disponibles. Dans le cas des plantes arbustives comme le caféier, il est même d'autant plus important de pouvoir prédire les rendements que les « délais de production des jeunes plantes peuvent atteindre plusieurs années »[3].

Conscient de cet enjeu et désormais personnellement informé de l'impasse relative que constitue la recherche de l'optimum au moyen des méthodes de programmation linéaire, dans sa thèse de troisième cycle préparée avec Sadi Essad et soutenue à l'Université de Paris-Sud Orsay[4], Philippe de Reffye préconise donc avant tout une approche purement observationnelle devant la structure de l'arbre :

« Le présent travail se propose d'étudier les facteurs de la fertilité à un niveau purement agronomique, tel que le caféiculteur peut l'observer lui-même. »[5]

De Reffye choisit donc délibérément de ne pas se pencher sur « les mécanismes intimes de la fertilité des caféiers »[6] (biologie de la fleur, genèse des cellules, fécondation et développement des fruits et des graines) car, selon lui, si on ne les ignore pas totalement, on est encore loin de savoir dans quelle mesure exacte ces divers facteurs conditionnent la productivité des caféiers. Il procèdera donc à une modélisation descriptive et non explicative, à cette échelle, tout au moins. Cette approche contraste fortement avec son étude de DEA dans la mesure où son horizon d'analyse n'est plus du tout cytogénétique. Or, comme on l'a vu, que ce soit pour le caféier ou pour les plantes herbacées, c'est bien la productivité qui intéresse toujours au premier chef les agronomes. Dans le cas du caféier, cependant, les clones sont répertoriés, les hybrides existent et sont maîtrisés. Le problème pragmatique d'amélioration n'est donc plus ici celui d'une stabilisation d'hybrides vigoureux comme pour *Lolium perenne*. Le niveau cellulaire et chromosomique pertinent n'est plus le bon. L'approche par le rendement global ne convient pas non plus, comme de Reffye s'en est persuadé avec son travail antérieur. La question pragmatique qui se pose donc à lui est la suivante : comment contrôler cette productivité ? Ou plutôt : comment trouver des variables de contrôle pouvant servir à évaluer *a priori* cette productivité de sorte que l'on pourrait prédire les performances de différentes espèces de caféiers ? Le premier essai de 1974, par un modèle de régression doublé d'une recherche d'optimum, indique que l'approche par les caractères morphologiques censés intervenir très indirectement (mais fonctionnellement) dans le rendement laisse à désirer. Les caractères physiologiques traditionnels (les différentes mesures de

[1] Il écrira plus tard : « Il fallait démonter le mécanisme de la chaîne de production qui conduit de la fleur au fruit », [Reffye (de), Ph., *et al.*, 1996], p. 3.
[2] [Demarly, Dattée, Kammacher, Essad, 1975], p. 1.
[3] [Demarly, Dattée, Kammacher, Essad, 1975], p. 1.
[4] En septembre 1975, devant les professeurs Demarly, Dattée et Kammacher.
[5] [Reffye (de), Ph, 1975], p. 2.
[6] [Reffye (de), Ph, 1975], p. 2.

la feuille, l'épaisseur du rameau) y ont semblé très peu décisifs, au contraire de caractères architecturaux plus directement et plus intuitivement liés au nombre de cerises par arbre, comme le nombre de nœuds par rameau, par exemple, ou comme le port de l'arbre.

Il faut donc changer de point de vue, adopter une approche plus locale sur l'arbre et sur les cerises, tout en restant au plus près d'évaluations pragmatiques. Dans ces conditions, adopter le point de vue du caféiculteur, c'est décider de se pencher sur l'aval des processus qui déterminent la productivité des fruits, autrement dit se concentrer uniquement sur la fertilité des ovules dans les phases finales de fructification, c'est-à-dire encore sur le développement des graines à l'intérieur de la cerise du caféier. Il suffit de remonter juste un peu en amont de ces derniers processus qui précèdent la récolte des grains et de trouver des observables permettant de prévoir cette récolte peu avant qu'elle n'intervienne. L'objet du travail de thèse de de Reffye est alors de montrer qu'il est possible, premièrement, de trouver de tels observables, deuxièmement, de les faire s'accorder avec des hypothèses modélisatrices à la fois simplifiantes et biologiquement crédibles. Cela lui permet de proposer une « formulation mathématique » globale qui, tout en les simplifiant, ne fait pas violence à la complexité des processus physiologiques intimes de la plante.

Modéliser, c'est former des hypothèses

Pour formuler ce genre de modèles *a priori*, il faut pouvoir se donner des hypothèses sur les rapports qu'entretiennent les observables. On s'arrange alors pour trouver précisément des observables tels qu'ils permettent de faire des hypothèses menant à des modèles simples et calculables : hypothèse de la nature discrète des caractères observables (dans ce cas précis, un transfert de la méthodologie propre à la génétique formelle devient possible), hypothèse d'indépendance, hypothèse de simple additivité des observables… Remarquons bien que l'on choisit parmi les observables ceux qui permettent de faire une hypothèse de formalisation rigoureuse et manipulable. On ne fait donc pas l'inverse : on ne choisit pas l'hypothèse ou le style de formalisation d'abord pour choisir seulement ensuite les observables qui pourraient bien y correspondre. L'approche de Reffye sera encore modéliste au sens de la modélisation statistique déracinée, c'est-à-dire au sens précis que Ronald A. Fisher a donné dès 1922 à l'expression de « loi mathématique hypothétique »[1]. Pour quelles raisons ? On sait que le développement des graines de caféiers admet trois différentes issues possibles. En effet :

[1] Voir *supra* et [Giegerenzer, G. *et al.*, 1989, 1997], pp. 110-113. De Reffye ne cite pas Fisher dans sa bibliographie mais il cite l'ouvrage français faisant référence dans les années 1970, le monumental (deux tomes d'environ 600 pages chacun) *Analyse de données* de J.-P. Benzécri, paru en 1973. Toutefois son approche n'est pas absolument biométrique encore moins « analytique » au sens de l'analyse de données de Benzécri puisque l'école qu'il connaît et qu'il suit le mieux est celle de la génétique formelle. Or, cette école a d'abord pu se présenter comme non modéliste, c'est-à-dire comme n'ayant pas eu à renoncer à la théorisation mathématique, mécanique et explicative des phénomènes biologiques, dans la mesure où son approche se concentrait sur le niveau individuel des gènes et sur les caractères observables de nature discrète. Voir [Giegerenzer, G. *et al.*, 1989, 1997], p. 145. Elle ne s'est présentée comme « modéliste » qu'après sa conciliation avec la biométrie dans les travaux de Fisher, notamment. De son côté, l'école de Benzécri, très influente dans la France des années 1960-1970, a pu sembler un moment dissidente dans la réconciliation fishérienne des approches biométrique et mendélienne autour de la notion de modèle, en ce qu'elle a préféré « appréhender directement les faits dans leur complexité, sans l'interposition d'un modèle plus ou moins conventionnel », [Vessereau, A., 1947, 1992], p. 127. Cette école a davantage insisté sur le moment inductif du recours aux statistiques. Mais elle a négligé le moment déductif du recours aux lois de probabilité. En effet, le passage de l'un à l'autre se fait sans certitude rationnelle mais seulement conformément à une certitude pratique. Voir [Vessereau, A, 1947, 1960, 1988], pp. 27-28. Rompant avec les perspectives de la biométrie française, c'est avec cette seule certitude pratique que de Reffye décide de travailler et de poursuivre son enquête rationnelle dans le second travail de 1974. Donc, même s'il cite l'ouvrage de Benzécri (comme on cite un ouvrage incontournable dans une bibliographie), en réalité il n'en suit pas la philosophie ultra-empiriste. C'est en ce sens qu'il se juge davantage impressionné et influencé par ce qu'il appelle les « modèles » de la physique mathématique classique qu'on enseigne dans les classes préparatoires. Il

« Le développement des graines à l'intérieur de la cerise peut aboutir à trois possibilités :
1) les avortements précoces
2) les avortements tardifs
3) les graines normales. » [1]

Ces différentes issues sont donc bien distinctes. À ce titre, elles permettent de définir un modèle probabiliste où des aspects aisément repérables pour le caféiculteur sont mis en avant. Pour ce faire, de Reffye définit d'abord ce qu'il appelle la fertilité d'un arbre donné : c'est son pourcentage de transformation d'ovules en graines. Comme nous l'avons vu, il serait souhaitable de prédire cette fertilité ou, tout au moins, d'être capable de l'évaluer au fur et à mesure de l'avancée de la fructification grâce à des « caractères » observables. Il va donc s'agir d'exprimer la fertilité comme fonction statistique de ces caractères. Le terme « caractère » lui vient, en l'occurrence, de sa fréquentation de la modélisation théorique en génétique mendélienne et formelle. Comme ces caractères sont non continus, c'est-à-dire discrets (tels ceux que Mendel avaient en son temps mis en avant), puisqu'ils peuvent se réduire à des présences ou absences de certaines propriétés (d'où l'importance de s'en tenir à une approche globale et pragmatique afin de se placer à une échelle où l'on peut discrétiser sans dommage les caractères biologiques), il est possible de se proposer des lois probabilistes élémentaires, simples et *a priori* susceptibles de gouverner ces caractères et leurs combinaisons multiples. C'est donc bien là que l'approche de de Reffye est également modéliste et pas seulement statistique et analytique. Il s'agit de se proposer un scénario présidant à la constitution des observables dans la plante. Ce scénario doit permettre non pas d'expliquer les processus physiologiques de façon causale mais seulement d'insérer ces observables dans un récit statistique sous-jacent régi, pour sa part, et au contraire des processus physiologiques soupçonnés, par certaines lois probabilistes simples et dont on peut en conséquence anticiper le comportement probable de façon théorique. De plus, le scénario statistique ne correspond pas ici à un modèle assis sur des hypothèses linéaires, donc prêtant à une recherche d'optimum par une méthode de programmation linéaire, dans la mesure où les caractères morphologiques, à la différence de ceux du premier article de 1974, y sont de nature discrète et non continue.

Construire un caractère non directement observable : une probabilité objective

Il reste à exprimer, dans ce scénario, comment interviennent les caractères pour la constitution de la fertilité. Or, on ne peut pas exprimer la fertilité directement en fonction du *nombre* des cerises présentant tel ou tel caractère sur tel arbre, mais seulement en fonction de leur *distribution statistique*. Mais de quoi la *distribution statistique* des caractères est-elle finalement l'indice ? De Reffye choisit de supposer qu'elle est l'indice de la manifestation de lois de probabilités simples et identiques, quel que soit l'arbre, comme la loi binomiale[2]. C'est cette

---

est donc plus proche de Fisher que de Benzécri. Il va même au-delà parce qu'il connaît les modèles probabilistes de la recherche opérationnelle.

[1] [Reffye (de), Ph., 1975], p. 1.

[2] Une loi binomiale intervient lors d'épreuves répétées sur des événements complémentaires. Ainsi, si l'univers se réduit à deux événements, lorsque l'on répète *n* fois le tirage aléatoire entre ces deux événements, les probabilités respectives de ces deux événements, *p* et *1-p*, se composent pour former celles de leurs différentes combinaisons. Les valeurs de ces probabilités composées sont alors égales aux termes successifs du binôme de Newton $((1-p) + p)^n$ (d'où le nom de loi binomiale) : la probabilité globale que l'événement dont la probabilité élémentaire est p se répète k fois sur n tirages est donc $P_k = C_n^k p^k (1-p)^{n-k}$.

supposition qui est d'abord traitée à titre d'hypothèse testable. Les caractères dont les taux de présence ou d'absence statistiques sont observés et mesurés sur les arbres permettent ainsi de remonter à leur probabilité d'apparition. L'approche modéliste a donc pour conséquence de nous obliger à adopter une interprétation quasi-objectiviste des probabilités[1] puisque ce sont ces probabilités qui serviront à leur tour à définir la fertilité globale de l'arbre. Autrement dit, on ne s'arrête pas à la mise en évidence des probabilités et à l'estimation de leurs valeurs. C'est cela qui impose de traiter les probabilités, que le scénario hypothétique nous a commandé d'introduire, comme des objets ou quasi-objets. Malgré le fait qu'elles ne représentent pas la mesure d'une entité physique concrète, on les traite quasiment comme des mesures d'objets biologiques car on les fait entrer dans un processus algébrique qui seul nous donnera ce que l'on cherche finalement à évaluer, en l'occurrence la fertilité de l'arbre.

Philippe de Reffye parvient ainsi à définir quatre paramètres dont les trois premiers sont estimables en champ par des échantillons représentatifs prélevés systématiquement et à des dates précises (qui sont fonction du degré de maturation des cerises) sur les caféiers. Ces quatre paramètres sont :

P1 : la probabilité pour un ovule de voir apparaître l'albumen (formation des cerises),
P2 : la probabilité pour un ovule de voir mûrir l'albumen (formation des grains),
r : la probabilité de maturation des jeunes fruits,
U : la probabilité qu'a une fleur de donner un jeune fruit[2].

De Reffye montre alors que, tous les paramètres clés ayant été pris en compte, la fertilité totale d'un arbre s'écrit simplement comme le produit de ces quatre paramètres ou probabilités :

$$f = U * P1 * r * P2$$

Une grande partie du travail du second article de 1974 et de la thèse de 1975 a alors consisté à tester les hypothèses de ce modèle mathématique à l'aide des distributions fournies par les échantillons mesurés sur les arbres :

[1] L'interprétation objectiviste est celle qui consiste à voir dans les mesures statistiques la manifestation d'un hasard objectif intervenant dans les phénomènes eux-mêmes. Elle va souvent de pair avec une perspective modéliste selon l'historien et sociologue des sciences Ian Hacking [Hacking, I., 1990, 2001], p. 98 : « the fundamental distinction between 'objective' and 'subjective' in probability – so often put in terms of frequency *vs. b*elief – is between modelling and inference. » L'interprétation subjectiviste attribue ces fluctuations aléatoires à l'impossibilité de notre total contrôle ou de notre totale connaissance des conditions dans lesquelles nous mesurons ces phénomènes. Or, l'approche modéliste de la fructification semble pouvoir donner raison aux deux. Tout dépend du niveau ontologique que l'on choisit de valoriser. Si l'on juge plus réel, c'est-à-dire plus ontologiquement fondé, le niveau des processus physico-chimiques, on considérera que l'échelle plus agrégée de manifestation des caractères de la fructification, en faisant intervenir des lois de probabilité, hérite de l'ignorance dans laquelle nous sommes à l'égard de ces phénomènes élémentaires. On optera alors pour une interprétation subjectiviste du modèle de fructification et on ne verra pas là de rupture majeur avec le courant dominant de la biométrie française. Mais si l'on ontologise préférentiellement le niveau de la graine et du fruit, ce qui peut aussi se justifier, par exemple dans un cadre agronomique (c'est ce que l'on appelle alors faire de la science « pragmatique » : mais cette qualification est finalement très relative comme on le voit), alors c'est ce niveau de la graine qui sera considéré comme élémentaire. Et, à ce niveau, on pourra tout aussi bien considérer qu'on a affaire à un hasard « objectif », d'où une interprétation que nous pouvons qualifier en ce cas de quasi-objectiviste. Par là le formalisme se trouve presque ré-enraciné.

[2] Dans notre présentation, nous simplifions le modèle de de Reffye, dans la mesure où il faudrait tenir compte, comme lui, du fait qu'il y a deux loges dans une cerise et non une seule. Mais cette considération ne ferait que compliquer le calcul sans modifier pour autant les principes généraux mis en œuvre.

« On cherche alors si les proportions trouvées entre les trois catégories de cerises peuvent provenir d'une loi binomiale. »[1]

La validité du modèle probabiliste est donc testée. De Reffye utilise pour ce faire les tests de significations notamment le test du χ^2 (classique en statistique inférentielle depuis les travaux de Karl Pearson publiés en 1900[2]). Tous les ajustements qu'il trouve semblent satisfaisants. En ce qui concerne P1 et P2, il met au jour des valeurs caractéristiques pour chaque espèce et pour chaque forme hybride de caféier. Ainsi c'est telle loi binomiale, avec son paramètre ou probabilité P, qui devient, aux yeux de de Reffye, une caractéristique « de l'arbre lui-même tout entier »[3]. Cela atteste selon lui d'une détermination principalement génétique de ces probabilités. L'approche modéliste n'a donc pas qu'une incidence descriptive ou purement déracinée pour l'agronome qu'est de Reffye. Car elle nous offre une grille de lecture transversale qui nous apprend à voir autrement les phénomènes élémentaires sans forcément nous obliger à les considérer microscopiquement : dans la mesure où l'on observe que des rameaux *différents* développent, dans un *même* arbre, les *mêmes* probabilités P1 et P2 (phénomène inappréciable sans cette grille de lecture qu'est justement le modèle), l'observation guidée par le modèle *a priori* permet de suggérer l'idée de processus causaux à échelle globale, c'est-à-dire à l'échelle de l'arbre entier, donc qui ne peuvent être commandés en dernier ressort que par la génétique. Le modèle est donc loin d'être une fiction pour de Reffye. De surcroît, en ce qui concerne les déviations à la loi binomiale qui peuvent apparaître, elles sont interprétées par de Reffye comme provenant de causes de nature écophysiologique : ce peut être l'altitude par exemple[4]. Et c'est le taux de ces déviations qui est rapporté dans le paramètre U.

Modéliser pour exhiber des faits biologiques

Dans la rédaction de sa thèse de 1975, un peu comme dans son travail de DEA sur le « module » des chromosomes, de Reffye tient à souligner l'idée que l'approche modéliste a mis indirectement en évidence des *faits* biologiques jusqu'alors non reconnus. Selon lui, la capacité de lecture nouvelle qu'offre la formulation mathématique de type modéliste légitime que l'on parle de l'« acquisition de faits expérimentaux », notamment de ce fait expérimental que « la maturation des graines suit un processus de type purement binomial basé sur l'indépendance génétique des graines à l'intérieur de la cerise »[5]. Ce qui signifie que la possibilité d'ajuster à des données un modèle *a priori* imposant une hypothèse d'indépendance[6] entre les graines serait une *preuve* de cette indépendance. Le fait expérimental nouveau est donc ici exprimé dès le départ dans une hypothèse de modélisation *a priori* qui s'est trouvée être *a posteriori* significativement corroborée par les données.

Comme de Reffye fait du test de signification une *validation* effective du modèle binomial[7], dès lors que, comme on l'a vu, sa référence épistémologique principale demeure la théorisation de

[1] [Reffye (de), Ph., 1975], p. 7.
[2] [Giegerenzer, G. *et al.*, 1989, 1997], p. 79.
[3] [Reffye (de), Ph., 1975], p. 10.
[4] [Reffye (de), Ph., 1975], p. 13.
[5] [Reffye (de), Ph., 1975], p. 31.
[6] Il s'agit de l'indépendance entre deux grains voisins pour la manifestation du même genre d'événements dans la maturation.
[7] Ce qui pourrait lui être contesté. C'est donc bien une décision de sa part. Car, comme de nombreux mathématiciens le rappellent depuis la naissance des tests de signification (même si cela fait justement encore débat), il n'y pas de raison de type purement logique qui nous autorise à passer d'une fréquence analysée à une probabilité synthétisée.

la physique mathématique, il se sent en droit de donner immédiatement une origine biologique significative (ici génétique) à ce fait probabiliste qui lui paraît objectif parce que mesurable, reproductible pour un clone et inscriptible en une loi mathématique simple. Il lui semble qu'il est nécessaire d'attribuer à la détermination génétique de l'arbre la présence de ce fait global très stable et indépendant de l'environnement qui l'affecte.

La suite du travail de thèse consiste dans l'utilisation systématique de ce nouvel outil d'évaluation de paramètres pour l'étude comparative de la fertilité chez différents caféiers dans différentes conditions. C'est là que le travail plus théorique reçoit son application agronomique. Il se confirme notamment que l'on peut clairement dissocier certains paramètres conditionnés par la seule génétique de l'arbre (P1 et P2) de ceux qui le sont aussi par l'environnement et par la physiologie. Ainsi, une des phrases-clés de la conclusion évoque les retombées économiques d'une telle mise au jour :

« Contrairement aux paramètres 'physiologiques' U et r, nous avons vu que P1 et P2 demeureraient invariables pour un clone donné. Ce fait a été vérifié en plus de l'Arabusta 1331, sur plusieurs autres clones (arabica, robusta, arabusta, etc.). Si les conditions sont idéales, par contre on peut imaginer que, même pour les arbres les plus sensibles : U = r = 1.

P1 et P2 sont des paramètres génétiques programmant une fréquence fixe d'avortements précoces et d'avortements tardifs de l'ovule, ce qui déterminent la valeur économique de l'arbre. »[1]

Comme nous avons commencé à le dire, on perçoit également dans cette phrase l'écho d'un autre acquis de ce travail pour de Reffye. Cet acquis est plus souterrain car plus méthodologique : il s'agit de l'interprétation de la probabilité d'un caractère observable comme étant en fait en elle-même le caractère génétique à considérer, désormais seul pertinent. Il conçoit alors cette probabilité comme apparentée à un caractère génétique à part entière, si ce n'est individuellement programmé, en tout cas dont on peut méthodologiquement supposer qu'il est individuellement programmé dans le génome. Par l'effet d'un glissement dans l'objectivation, rendu possible par la modélisation probabiliste objectiviste, on choisit de penser comme caractère génétiquement programmé non pas les caractères de départ, les variables aléatoires observables (formation ou non des cerises, formation ou non des grains), mais les paramètres des lois de probabilité de ces caractères.

La réception de la thèse de 1975 : une modélisation étrange mais efficace

Quelle est finalement la fortune de ces travaux de thèse ? À en croire le rapport du jury, il s'agit là d'une « contribution extrêmement importante au problème de l'analyse des facteurs du rendement du caféier en vue de son amélioration »[2]. Le jury s'attache alors à mettre en valeur non pas tant le choix qui a été fait de se pencher sur la fertilité des arbres, ce qui lui paraît aller de soi, mais sur la façon d'aborder ce problème : « la manière de le résoudre et la valeur des conclusions

---

L'objectivité de la fréquence mesurée n'est pas de même nature que l'objectivité de la probabilité supposée à partir de la fréquence mesurée. On retrouve là une caractéristique plus générale des modèles mathématiques : si un modèle est possible, alors un autre modèle est toujours également possible. De Reffye s'appuie ici nettement sur une certitude pratique et non sur une certitude logique, c'est-à-dire qui viendrait des règles axiomatisées et internes de l'outil statistique.

[1] [Reffye (de), Ph., 1975], p. 71.

[2] [Demarly, Dattée, Kammacher, Essad, 1975], p. 1.

présentées nous semblent par contre exceptionnelles »[1]. Suit alors un résumé de l'approche et des résultats de la thèse. Parmi les résultats concrets prometteurs, il y a cette prévision qui enchante le jury selon laquelle on pourrait faire produire aux meilleurs caféiers Arabusta l'équivalent en tonnage (2,6 T/ha) des meilleurs Robusta mais avec une qualité supérieure. À l'issue de ce court rapport de trois pages, il est une phrase que nous devons cependant citer car elle nous paraît rendre très bien compte de la manière dont ces agronomes statisticiens ont accueilli la nouvelle approche modélisante de de Reffye dans leur domaine :

« *Les critiques que l'on peut porter tiennent essentiellement au parti pris de ce travail de recherche qui se situe* à mi-chemin de la Biologie et des Mathématiques sans qu'une véritable option soit prise*, ce qui n'est d'ailleurs peut-être pas souhaitable si l'on se place sur le plan de l'efficacité.* »[2]

On reproche au fond à de Reffye de fournir un travail inclassable y compris aux yeux des agronomes. Au vu des indications que nous avons fournies précédemment sur le contenu de la thèse, il nous est cependant possible d'interpréter plus précisément les raisons de la présence d'une telle gêne chez les membres de son jury de thèse. Elles nous paraissent assez significatives. D'abord, très curieusement, il ne leur semble pas que l'on puisse classer ce travail dans le domaine de la biologie proprement dite. Pourtant, le sous-domaine qui pourrait lui convenir serait peut-être bien celui de la biologie théorique. Nous l'avons vu, ce secteur, déjà ancien à l'époque, présente de nombreuses approches très mathématisées. Or, dans la thèse de de Reffye, il y a bien à la fois des mathématiques et de la biologie ; mais ce qui distingue son approche des travaux classiques de la biologie théorique, c'est le fait qu'il renonce consciemment à donner un sens biologique immédiat aux concepts mathématiques qu'il introduit, comme la probabilité de formation d'un grain. Son origine biométrique fait qu'il ne refuse pas la modélisation de l'aléa en tant que tel, contrairement à la plupart des biologistes théoriciens. Pour lui, la signification biologique, plus précisément l'origine biologique de ces concepts ou paramètres, sera suggérée seulement par la suite, grâce à leur étude empirique et une fois qu'ils auront été insérés dans le scénario du modèle : dès lors, les faits mesurés nous apprendront que ces paramètres, peut-être d'abord fictifs, représentent bien une caractéristique, certes nominale, formelle, mais fortement inscrite dans le matériel génétique de l'arbre. Au départ, afin de construire les concepts de modélisation P1 et P2, il n'y a donc pas eu de collaboration étroite entre l'interprétation biologique d'un fonctionnement et l'insertion mathématique d'une fonction. Au contraire de ce qui se produit dans la physique théorique, la construction du concept ne ressortit pas ici au travail d'une intrication étroite et serrée entre biologie et mathématique. L'interprétation biologique d'un ensemble d'événements d'abord pris en bloc est venue après que les observations guidées par le modèle aient été menées.

On voit aussi qu'il ne s'agit pas non plus d'une biologie mathématisée spéculative ni de développements mathématiques purement autonomes dans la mesure où cette approche est entièrement asservie à ce qui est directement observable en champ par le caféiculteur (puisqu'elle en part), et cela à l'échelle d'une pratique humaine intuitive. Ses outils sont en effet ceux des mathématiques descriptives : les statistiques, les lois de probabilités, les tests de signification. S'agit-il dès lors d'un travail classique de biométrie ou de pure analyse de données ? Pas davantage, puisque ce premier travail de de Reffye ne consiste pas à se contenter d'une approche

[1] [Demarly, Dattée, Kammacher, Essad, 1975], p. 1.
[2] [Demarly, Dattée, Kammacher, Essad, 1975], p. 3. C'est nous qui soulignons.

phénoménologique culminant dans des réductions de variances ou dans des analyses en composantes principales entre des phénomènes complexes. Mais elle prétend discerner *a priori* une échelle pertinente, certes peu habituelle aux physiologistes, au contraire des agronomes, et à laquelle on peut considérer que les phénomènes ont un comportement suffisamment simple pour permettre l'ajustement d'un modèle probabiliste usuel.

Finalement, c'est justement cette question d'échelle, c'est plus précisément le caractère inédit du niveau biologique que de Reffye choisit de « traduire » mathématiquement qui explique l'indécision dans laquelle se trouvent les biologistes et statisticiens de son jury. Il ne s'agit ni d'une théorisation mathématique classique de phénomènes biologiques, ni d'une expérimentation statistique visant à analyser des phénomènes complexes. Mais, comme l'indique la dernière partie de la phrase citée, le jury n'estime pas rédhibitoire une telle schizophrénie épistémologique. Et, en grand seigneur, il attribue finalement cette ambivalence épistémologique à l'objectif manifeste de cette approche, à savoir « l'efficacité ». Il fait même l'hypothèse qu'il ne soit guère possible de procéder autrement dans des recherches sur la fertilité. Tout le monde s'accorde donc finalement sur un point minimal : le caractère essentiellement pragmatique de ces travaux. On ne sait pas ce qu'ils sont, mais on sait ce qu'ils font et c'est le principal. D'ailleurs, à cette époque, de Reffye lui-même revendique ce caractère pragmatique. Ce qui est, de sa part, pour le moins troublant. Rappelons-nous en effet ce qui l'avait fasciné dans la physique mathématique : ce n'était pas sa réussite pragmatique mais sa faculté à exposer sous forme mathématisée des lois de la nature simples et générales. En fait, les caractères qu'il a identifiés avec son approche modéliste sont déjà, pour lui, des lois de la nature, bien qu'elles ne soient valables qu'à une échelle restreinte.

Hégémonie et résistance de la biométrie à l'IFCC

Auparavant, en 1974, et en prévision de la soutenance, Philippe de Reffye a publié les résultats de ses travaux dans deux articles de la revue trimestrielle de l'IFCC, intitulée *Café, Cacao, Thé*. Comme nous l'avons vu, seul le contenu du second article sera repris dans la thèse. Or, dans ces premières publications de 1974, que cela soit un choix stratégique de la part de de Reffye ou l'effet d'une censure sans doute bienveillante du comité de rédaction ou de son directeur de thèse, le caractère relativement inédit de la première thèse eu égard à la pratique de modélisation qu'elle propose ne reçoit pas de publicité particulière. Ce qui est novateur dans l'approche mathématique y est minoré dans l'exacte mesure où les termes de « modèle » et de « modélisation » n'apparaissent pas, notamment dans les titres. À quoi cela peut-il être dû ? Pour le comprendre, il nous faut revenir un moment sur la revue elle-même, sur sa perspective éditoriale et sur l'esprit qui habite les publications d'analyse quantitative que l'on y trouve d'ordinaire depuis sa création.

Dès 1958, la revue *Café, Cacao, Thé* est publiée par l'IFCC, à la place de l'ORSTOM. Les publications qu'on y trouve sont à visées essentiellement pragmatiques ou techniques, mais très peu théoriques. Elles peuvent concerner aussi bien l'état économique du marché mondial du café ou du cacao que des procédés chimiques de protection contre les parasites ou l'évaluation de l'impact de l'utilisation de certains engrais. Cependant, au début des années 1960, le mot d'ordre précis est la réorientation vers des considérations chimiques, écophysiologiques et technologiques. En 1963, cette réorientation est textuellement exprimée dans le n°7 qui publie les actes du « Premier colloque international sur la chimie des café verts, torréfiés et leurs dérivés »[1] :

[1] Ce colloque s'était tenu à Paris du 20 au 22 mai 1963. La majorité des participants étaient français.

« [les lecteurs de la revue] trouveront désormais à chaque parution […] un article sur la chimie ou la technologie des cafés ou des cacaos, ceci pour répondre au vœu exprimé par les participants du colloque. De plus, la partie documentaire consacrée à la chimie et à la technologie sera développée. »[1]

Quelques années plus tard, au début des années 1970, même si le comité de rédaction admet alors assez largement un certain nombre de personnalités de différents horizons (ORSTOM, Faculté des Sciences de Paris, Syndicat des Planteurs de Café et de Cacao et Institut National d'Agronomie), l'institution la plus représentée y reste bien entendu l'IFCC. Le président du comité de rédaction n'est autre que le directeur général de l'IFCC lui-même. Or, les spécialités représentées par ce comité de rédaction sont assez révélatrices de l'orientation de la revue. Elles sont aussi révélatrices des délimitations *a priori* que se fixe de manière programmatique la recherche agronomique menée alors à l'IFCC en termes de disciplines jugées désormais immédiatement voisines ou directement utiles : pédologie (ORSTOM), entomologie (IFCC), physiologie végétale (Faculté des Sciences de Paris), pathologie végétale (Institut National Agronomique).

On voit donc combien le style des travaux de thèse de de Reffye pouvait en effet trancher : il ne se rapporte ni de près ni de loin à aucune de ces disciplines fondamentales collaborant habituellement avec l'agronomie de terrain. Or, même si son initiative est encadrée par J. Snoeck, le chef de la « Division d'agronomie du Centre de recherches de l'IFCC en Côte-d'Ivoire », les deux premiers articles qu'il publie en 1974 dans cette revue insistent donc très peu sur sa proposition d'une « formulation mathématique » ou d'un « modèle », à la différence de la thèse de troisième cycle elle-même. Par ailleurs, si l'on procède à un dépouillement systématique de la revue depuis sa création en 1957, il apparaît que les termes clés « modèle » ou « modélisation »[2] n'apparaissent à aucun moment avant que de Reffye lui-même ne se décide à les employer pour la première fois explicitement dans son article plus tardif de 1976. Autrement dit, au début des années 1970, l'approche par modélisation ne semble pas être entrée dans les mœurs des agronomes de l'IFCC même si, en revanche, ces derniers pratiquent assez souvent l'analyse statistique et les méthodes de la biométrie anglo-saxonne.

En effet, dès la fin des années 1960, dans la station camerounaise de l'IFCC par exemple, il existe une « section de biométrie » qui se penche sur les ravageurs du cacaoyer par des méthodes statistiques fishériennes de type plans d'expérience, randomisations par blocs et analyses de variance. Pourtant, il se trouve qu'assez vite, les ingénieurs de l'IFCC et de l'ORSTOM s'aperçoivent que les méthodes biométriques classiques par « plans d'expérience » ne fonctionnent pas non plus vraiment dans ce contexte des cacaoyères traditionnelles. C'est que « les productions des cacaoyers, observées dans les conditions naturelles ne répondent pas aux hypothèses implicitement admises lors de la mise en œuvre de ces schémas »[3]. Voici en quels termes l'ingénieur en chef des services de l'agriculture d'outre mer, H. Marticou et son collègue R. Muller résument la situation :

« Les Auteurs attribuent les échecs constatés, tant au Cameroun que dans les autres pays producteurs de cacao :

---

[1] [Café, Cacao, Thé, vol. 7, n°4, oct.-déc. 1963], p. 316.

[2] Sur l'index des 2 CD-Rom contenant l'intégralité des articles de la revue *Café, Cacao, Thé* ([Café, Cacao, Thé, CD I] et [Café, Cacao, Thé, CD II]), les mots clés « modèle », « modèle mathématique », « modèle de simulation » ne renvoient qu'aux différents articles de de Reffye de 1976 à 1983 ainsi qu'à deux articles de D. Snoeck de 1991 et de 1993, et enfin à un article de P. Lachenaud de 1993.

[3] [Marticou, H. et Muller, R., 1964], p. 173.

- *aux facteurs d'hétérogénéité génétique, pédologique et microclimatique qui caractérisent généralement les plantations de cacaoyers et que les schémas expérimentaux classiques ne sont pas en mesure d'éliminer ;*
- *au fait que les caractéristiques de la production de cacaoyers ne sont pas en accord avec les hypothèses implicitement admises lors de la mise en pratique d'un essai agricole :*
    - *normalité de la distribution des observations en l'absence d'intervention ;*
    - *additivité des effets des interventions ;*
    - *homogénéité des dispersions des observations autour de leurs moyennes. »*[1]

Cependant, ces ingénieurs agronomes ne sont pas seulement démunis matériellement et financièrement, ils le sont aussi techniquement et conceptuellement : ils n'abandonnent donc pas pour autant l'approche biométrique. La solution qu'ils proposent dans un premier temps consiste à prendre en compte cette hétérogénéité. Simplement ils tâchent de trouver des compromis. Ils adaptent la méthode classique notamment en essayant de trouver la taille optimale d'une parcelle pouvant servir à des plans d'expérience fishériens les moins imprécis possibles au vu des limitations en surface, en main d'œuvre et en personnel[2]. En 1969, les travaux de l'agronome R. Lotodé[3] iront résolument dans ce sens. Or, il est par ailleurs significatif qu'à cette même époque, R. Lotodé cherche sciemment et assez systématiquement à contourner une modélisation mathématique dont il n'ignore pas la possibilité mais qui, selon lui, proposerait des lois de probabilités qu'il estime par avance « difficiles à manier ». Cette expression est à prendre littéralement : il est d'après lui souhaitable d'exclure le plus possible les modèles mathématiques qui seraient difficiles à contrôler à la main, c'est-à-dire par le calcul à la fois mental et manuel. Dans son article de 1969, ce biométricien attitré de l'IFCC au Cameroun écrit par exemple :

« Suivant le stade observé d'une population d'insectes par exemple, celle-ci peut être décrite par plusieurs lois de distribution, telles que 'binomiale de Poisson', 'binomiale négative', types A, B ou C de Newman, types 1 ou 2 de Polya, etc. Ce sont des lois complexes difficiles à manier *et on*[4] *s'est aperçu qu'une simple loi de puissance reliant la variance des dénombrements [des insectes sur un arbre] à la moyenne satisfaisait tous les types de distributions déjà cités. Cette loi est de la forme* $s^2 = a.m^b$

où s^2 *est la variance des dénombrements (par arbre, par exemple),*

m la moyenne de ces dénombrements,

---

[1] [Marticou, H. et Muller, R., 1964], p. 201. Pour rappeler la nécessité de ces hypothèses, les auteurs s'appuient (*ibid.*, p. 181) sur le manuel des statisticiens français E. Morice et F. Chartier : *Méthode statistique*, tome II (*Analyse statistique*), publié par l'INSEE en 1954.

[2] Voir [Lotodé, R., 1971] : « Il s'agit en fait : […] de déterminer une taille de parcelle élémentaire optimum, qui pourra dépendre des circonstances (présence ou absence de lignes de bordure autour des parcelles élémentaires, nécessité dans certains cas de l'effet de masse, disponibilité en surface, personnel et crédit), mais qui donnera dans chaque cas le maximum de précision. »

[3] À la fin des années 1960, R. Lotodé est un ingénieur agronome de l'INA de Paris. Il est nommé d'abord « Maître principal de recherches » à l'ORSTOM. C'est à ce poste qu'on le retrouve notamment dans ses premières publications. Il est simple membre de la « Section de biométrie de l'IFCC au Cameroun » alors que J. Dejardin, statisticien et Directeur de recherches à l'ORSTOM en est encore le responsable en titre. À partir de 1969, R. Lotodé obtient cependant le poste de chef de ce qui s'appellera alors « Division de biométrie de l'IFCC au Cameroun ». Il rentre à Montpellier en 1977. Et il devient ensuite chef du « Service de Biométrie de l'IFCC à Montpellier », de 1981 à 1987, service dans lequel il contribuera essentiellement à développer l'analyse multivariée des données.

[4] Lotodé cite L. R. Taylor comme source de ce travail mais sans donner de référence précise. Son article de 4 pages est d'ailleurs dépourvu de bibliographie.

a et b étant deux coefficients. »[1]

Dans la suite de l'article, R. Lotodé utilise donc ce résultat que le biologiste des populations britannique Lionel Ray Taylor avait mis en évidence à la station de Rothamsted, pour simplifier son étude statistique de la répartition spatiale de ces ravageurs du cacaoyer que l'on appelle les mirides. D'autres choix simplificateurs du même genre seront ensuite faits par lui. Il les légitime par la nécessité qu'il y aurait sinon à recourir à un « ordinateur »[2] :

« *Les calculs ayant été faits manuellement, pour simplifier, nous avons utilisé comme donnée, non plus le dénombrement par semaine et par arbre, mais le cumul des dénombrements par arbre effectués au cours des cinquante-deux semaines.* »[3]

Plus loin, l'auteur se résout à employer quand même l'ordinateur mais en dernier recours et pour la seule évaluation d'une constante :

« *En fait, la transformation à utiliser est* $x \rightarrow (x+c)^{1-1/2b}$*, c étant une constante qui doit être calculée par approximation jusqu'à obtenir le minimum du rapport des variances extrêmes […] La recherche de la constante c ne peut être évidemment entreprise sans* l'assistance d'un ordinateur. »[4]

L'ordinateur est donc conçu par le biométricien comme un outil d'assistance pour les calculs difficiles à mener : c'est une machine à calculer permettant d'éviter de trop longs calculs itératifs à la main comme ceux qui sont engagés par la recherche d'une valeur par approximations successives. Par la suite, comme en témoignent d'autres publications de 1971 et 1974[5], les articles de Lotodé et de ses collègues biométriciens de l'IFCC au Cameroun continuent à présenter essentiellement des analyses de variance, où les calculs sont certes effectués par ordinateur, mais dont les auteurs n'estiment pas utile de préciser ni même d'indiquer les conditions dans lesquelles ils ont été menés par la machine. En revanche, en 1981, R. Lotodé publiera un article en commun avec un collègue pédologue P. Jadin[6] dans lequel figurera la liste intégrale d'un programme en FORTRAN servant à calculer les besoins en engrais des cacaoyers. Mais on voit que l'article met cette fois-ci l'accent sur le programme informatique et sur l'organigramme du programme dans la mesure où ce dernier reproduit clairement les choix d'engrais à effectuer par l'agronome pour chaque valeur d'équilibre chimique. Dans ce cas-là, le programme réplique donc quelque chose comme une politique conceptuelle, une réflexion humaine immédiate, une expertise fondée sur des valeurs chiffrées par l'assistant-calculateur qu'est l'ordinateur mais non un phénomène naturel en tant que tel. La conclusion évoque le gain économique et en rapidité que procure une telle programmation des tâches agronomiques en FORTRAN, que ce soit sur un IBM 360/65 (1 franc par calcul programmé pour 0,5 seconde de temps de calcul total) ou sur un IBM 3033 (cinquante centimes pour 0,03 s de temps de calcul).

---

[1] [Lotodé, R., 1969], p. 216. C'est nous qui soulignons.
[2] [Lotodé, R., 1969], p. 219.
[3] [Lotodé, R., 1969], p. 219.
[4] [Lotodé, R., 1969], p. 219. C'est nous qui soulignons.
[5] Voir, en plus de l'article précédemment cité, [Lotodé, R., 1971] et [Bruneau de Miré, Ph. et Lotodé, R., 1974].
[6] [Lotodé, R. et Jadin, P., 1981]. L'ingénieur agronome P. Jadin est alors chef de la section de pédologie de l'IFCC en Côte-d'Ivoire.

Finalement, dans ces années-là, les collègues de de Reffye à l'IFCC ne pratiquent pas une modélisation qui s'aventurerait au-delà des approches statistiques traditionnelles. Comme R. Lotodé, les biométriciens de l'IFCC cherchent avant tout à homogénéiser leurs supports expérimentaux afin que les modèles statistiques traditionnels s'appliquent dès lors que la randomisation à la Fisher exige une telle homogénéité[1] et une linéarité difficiles à obtenir en milieu tropical. Les biométriciens du Cameroun, spécialistes des cacaoyers, ont ainsi clairement fait le choix ou de trouver des modèles simples à manipuler (construire des abstractions) ou de « réduire au maximum les facteurs de variation autres que ceux dont on veut mesurer les effets »[2] (analyser des données) mais non pas celui de synthétiser les données. Or, c'est cette dernière voie qu'emprunte de Reffye.

[1] Voir sur ce point [Lotodé, R., 1971], p. 91.
[2] [Lotodé, R., 1971], p. 91.

CHAPITRE 23 – Modélisation fractionnée et simulation géométrique (1975-1981)

La recherche de modèles qui visent à améliorer le contrôle et la prévision de la fructification des caféiers doit se poursuivre. En effet leur rendement n'est pas entièrement explicité par la fertilité de leurs fleurs. Jusque là, le projet d'observer et de modéliser le détail de la production de fruit n'a connu que son commencement avec le choix de réifier en quelque sorte la probabilité pour en faire un caractère génétique observable et quantifiable. Selon de Reffye, il faut désormais passer de la synthèse de la graine à la synthèse du caféier en son entier. Rappelons-le en effet, la « fertilité » d'un arbre telle qu'il l'a définie n'est que le pourcentage de transformation de ses ovules en graines. Or, il existe un deuxième facteur qui détermine la production en grains de café d'un arbre : il s'agit de la « capacité de production » des fleurs elles-mêmes par arbre. Voyons en quoi ce nouveau problème diffère de celui que de Reffye s'était posé précédemment et qu'il avait résolu pour la thèse de troisième cycle. C'est lui qui le mènera aux premiers modèles d'arbres complets.

Comme l'indique de Reffye, on peut décomposer le rendement en grains de café par hectare de la façon suivante :

*« Rendement = nbre d'arbres/ha * nbre de fruits/arbre * nbre de graines/fruit. »*[1]

À ses yeux, en cette année 1976, il se confirme donc que le problème du rendement en café semble pouvoir s'éclaircir à condition que l'on n'adopte pas d'emblée une approche d'optimisation globale et par le haut, comme il l'avait lui-même tentée dans le premier article de 1974. Au contraire, il lui apparaît désormais clairement nécessaire de découper, plus précisément de *fractionner*, le processus de production de graines en ses différentes phases biologiques successives.

Or, dans la composition de l'équation précédente, deux facteurs sur trois sont déjà connus ou assez aisément connaissables. Le nombre d'arbres par hectare est connu, stable et contrôlé. Il dépend des choix raisonnés de l'arboriculteur. Le nombre de graines par fruit, pour sa part, peut être prévu par les modèles probabilistes binomiaux propres à chaque clone, ou à chaque hybride, en vertu des travaux antérieurs de de Reffye, précisément ceux de la thèse de troisième cycle. Mais ce qui reste très difficile à évaluer est le nombre de fruits (ou de fleurs) par arbre. C'est ce que l'on appelle encore la « capacité de production ». Or, ce facteur ne semble pas pouvoir être synthétisé directement selon des scénarios élémentaires de modélisation comme ce fut le cas pour la fertilité. C'est bien là que de Reffye va se trouver confronté à des difficultés inédites :

« Les nombreuses variables qui entrent dans la capacité de production rendent son analyse particulièrement complexe. »[2]

Quelles sont les raisons pour lesquelles de Reffye voit en la « capacité de production » un facteur biologique éminemment « complexe » ? Pour comprendre ce changement, il faut éclairer la manière dont il interprète les écueils rencontrés par les approches antérieures.

[1] [Reffye (de), Ph. et Snoeck, J., 1976], p. 11.
[2] [Reffye (de), Ph. et Snoeck, J., 1976], p. 11.

Représenter fidèlement plutôt que condenser

Dans l'article de 1976, de Reffye se livre à une critique en règle des solutions déjà adoptées par différents auteurs, mais sans les citer nommément[1]. Tel auteur croit ainsi pouvoir tirer directement parti de la formule précédente en s'imaginant qu'il est possible de connaître *a priori* le nombre de fruits par arbre : or, le fait est que cette détermination est « pratiquement irréalisable ». Autrement dit, c'est peut-être une solution théorique élégante mais qui ne donne pas prise sur le phénomène une fois que l'on se trouve sur le terrain. Elle ne peut en rien aider l'agronome qui veut se constituer un outil opérationnel. Pour évaluer la « capacité de production » de l'arbre, il faut se pencher sur ses détails morphologiques : ses ramifications, la morphologie de ses rameaux, son type de croissance, etc. Mais il faut de plus avoir un outil pour considérer ces détails *tous ensemble,* sinon on ne saurait décompter le nombre de fruits par arbre. Ce qu'il faut, c'est considérer l'arbre dans sa morphologie tout entière. Il faut donc nécessairement prendre en compte « à la fois toutes les caractéristiques d'architecture et de croissance de l'arbre »[2]. Dans ce cas de figure, le nombre de facteurs croisés et non contrôlés étant très grand, ce pourrait donc être un travail adapté aux méthodes de la biométrie.

Effectivement, une deuxième solution évoquée était davantage inspirée de la biométrie. Il s'agissait d'une analyse multivariée prenant en compte un nombre considérable de caractères architecturaux supposés intervenir dans le rendement : mesures de la circonférence de la tige, mesures de la feuille, des fruits et des grains. Le résultat de cette étude conduit, selon de Reffye, à un grand tableau de corrélations à partir duquel il est cependant assez vain d'espérer tirer l'information nécessaire. En effet, « une telle méthode nécessite de puissants moyens de calcul pour une efficacité le plus souvent douteuse »[3]. Même si c'est probablement son intention, sachant sa prédilection pour une attitude franchement modéliste, de Reffye n'attaque pas frontalement le recours à l'analyse multivariée en tant que telle : comme nous l'avons vu, ce serait mal venu dans la revue de l'IFCC qui publie régulièrement des travaux fondés sur de telles analyses. Son argument se contente de faire valoir une disproportion générale entre les moyens techniques engagés et l'espérance de succès afférente. Cet argument est intéressant parce qu'assez nouveau dans ce contexte et finalement très paradoxal. La critique qu'il fait ici de l'analyse multivariée a significativement évolué par rapport à celle avec laquelle il commençait son premier article de 1974 sur la « recherche de l'optimum » du rendement. Cette première critique consistait simplement à reprocher à l'analyse statistique son caractère trop descriptif ainsi que son incapacité à décider d'un optimum de fonctionnement pour une variable supposée dépendre des autres. En 1976, la critique est devenue autre parce que de Reffye a renoncé à rechercher directement l'optimum du rendement. Il faut nous y arrêter un moment.

La modélisation statistique est en effet attaquée par un flanc nouveau où elle ne pouvait s'imaginer en danger. De par son recours systématique à l'analyse multivariée, facilitée par l'utilisation désormais inconsidérée des calculateurs numériques programmables, la biométrie paraît en effet coupable d'être devenue trop théorique car trop éloignée des considérations d'efficacité de l'agronome. Ce qui est un comble si l'on sait qu'historiquement les outils qu'elle a

[1] À en croire sa bibliographie ([Reffye (de), Ph. et Snoeck, J., 1976], p. 31), il s'agit en fait de chercheurs indiens fidèles à la tradition biométrique anglo-saxonne : N. A. Awatramani et H. Subramanya pour la première solution critiquée, C. S. Srinivasan pour la deuxième solution. Ces trois auteurs ont publié leurs analyses dans la revue indienne *Journal of Coffee Research* (Balehonnur), respectivement en 1973 et 1972.
[2] [Reffye (de), Ph. et Snoeck, J., 1976], p. 11.
[3] [Reffye (de), Ph. et Snoeck, J., 1976], p. 11.

forgés proviennent de considérations très empiriques et pragmatiques ! Voilà donc où se tient le paradoxe. Qu'est-ce qui légitime selon de Reffye que l'on puisse évoquer ici une dérive spéculative de la biométrie ? Rien d'autre que le flou qui règne au sujet de l'issue d'une telle analyse : « une efficacité le plus souvent douteuse. » Le cœur du problème tient au fait que l'analyse multivariée, en ne faisant pas de choix *a priori*, pose des questions trop ouvertes à la nature : ainsi récolte-t-elle le pire comme le meilleur mais sans savoir comment l'organiser en une connaissance pragmatique et directement opératoire[1]. C'est en ce sens précis que l'empirisme de la biométrie confine paradoxalement à la spéculation, en particulier en agronomie[2]. La modélisation, de son côté, tout en paraissant plus théorique à certains égards parce que plus chargée d'*a priori*, pose ce faisant des questions fermées à la nature. C'est en ce sens qu'elle peut être plus opérationnelle. Par exemple et successivement : quel est ton paramètre de loi de probabilité binomiale si je suppose *a priori* que c'est bien cette loi que tu suis ? Réponse : une valeur précise dans un ensemble défini de valeurs. Ensuite (test de signification) : est-ce que la réponse que tu me donnes est significative ? Réponse : oui ou non. C'est la précision de la réponse et son caractère tranché, indépendamment du recours ou non à des lois de probabilité, qui donne une prise sur le terrain. Ces arguments généraux sont jugés d'autant plus décisifs par de Reffye que les emplois purement inductivistes de l'analyse multivariée ne donnent en effet aucun résultat utilisable pour le problème précis qui le préoccupe en ce début des années 1970. Son option épistémologique initiale (rechercher des « lois de la nature » mathématiquement exprimables) se trouve ainsi confortée par sa pratique de recherche. Ces lois, ce sont ses modèles.

Enfin, de Reffye voit encore un autre inconvénient dans le fait de recourir à l'analyse multivariée pour les questions de rendement en agronomie. Nous le verrons, cette critique est essentielle car c'est la prise en compte de cette limitation des approches multivariées qui va en dernière instance justifier la décision du passage à la simulation, c'est-à-dire du passage de l'analyse des données à la synthèse d'objets, dans le cas particulier de la croissance et de l'architecture des caféiers. Cette critique tient en une phrase simple : l'analyse multivariée est coupable de négliger un certain nombre de données. Ce qui là aussi peut sembler très paradoxal ! Même si l'analyse multivariée semble ne négliger *a priori* aucune donnée, les mesures qu'elle considère ne correspondent toujours chacune qu'à un instant de mesure particulier alors que « l'arbre est en continuelle évolution »[3]. Les arbres sont donc comparés directement en faisant abstraction de leur histoire particulière. Ainsi la différence entre certains types de croissance n'apparaît pas. Mais la critique ne porte pas seulement sur le mauvais traitement de la temporalité des phénomènes par les analyses statistiques habituelles. Cela est essentiel à percevoir. Le texte de de Reffye ne s'appesantit pas sur cette question de la temporalité, qui lui paraît évidente, même si elle peut sembler à un lecteur pressé la raison essentielle pour laquelle on opte en général pour une approche dynamique et donc pour une simulation. Il se trouve en fait que l'argument de la

[1] On pourrait observer de semblables retournements critiques dans d'autres travaux de la même époque en sciences de la vie. Nous aurons ainsi l'occasion de voir que les milieux de la foresterie américaine commencent eux aussi à rejeter ce primat donné au calcul massif, rassurant par son apparente objectivité et facilité, mais souvent insignifiant à bien des égards. À partir des années 1970, ils vont eux aussi se tourner vers la modélisation. Voir sur ce point notre entretien avec François Houllier [Houllier, F. et Varenne, F., 2000].

[2] L'école de Benzécri restera influente très longtemps dans les milieux des sciences humaines et sociales dans la mesure où ces disciplines ne se poseront pas tout de suite, ni dans les mêmes termes, la question que se posa en revanche assez tôt l'agronomie, à savoir : comment est-il possible de rendre opérationnelles nos spéculations ? Elle sera donc vite évincée dans les sciences de la vie orientées vers l'opérationnel, sauf dans la pure analyse de données appliquées à la médecine où elle restera par la suite cantonnée, car le primat de la physiologie règnera encore longtemps dans la biomédecine. Il y a donc bien une façon spéculative de recourir à la biométrie et aux statistiques.

[3] [Reffye (de), Ph. et Snoeck, J., 1976], p. 11.

temporalité n'est pas le seul. On y trouve aussi, comme nous allons le voir, une critique du traitement de la spatialité. Autant dire que ces critiques additionnées pourraient s'annuler. Puisque lorsque l'on dit d'une méthode d'analyse qu'elle ne rend compte ni de la temporalité, ni de la spatialité des phénomènes, c'est comme si l'on disait qu'elle ne rend compte de rien du tout ! Une critique qui porte sur la prise en compte à la fois de la temporalité et de la spatialité dans les solutions antérieures est-elle encore véritablement une critique de poids ? En quoi est-elle décisive pour de Reffye ?

Ce qui fait le caractère significatif pour lui de cette double critique, ce n'est pas le fait que les deux critiques s'additionnent mais plutôt le fait que l'une est enchâssée en l'autre : la critique qui consiste à dire que la spatialité a été négligée est enchâssée dans celle qui porte sur la temporalité. L'une ne peut aller sans l'autre :

« En effet, les mesures faites ne sont valables qu'à l'instant où on les effectue, car l'arbre est en continuelle évolution. Ces ensembles de mesures sont le plus souvent traités selon des méthodes statistiques multivariables afin d'étudier la variabilité du matériel. Mais l'analyse multivariable ne permet pas de visualiser directement l'architecture, car celle-ci est concentrée en un point. Les différences entre deux arbres ne peuvent s'exprimer que par une distance entre deux points, d'où une perte considérable d'information. Les résultats acquis sont donc toujours assez limités. »[1]

Pour avoir lui-même pratiqué ce genre d'analyse (analyse en composante principale) dans son premier travail de 1974, de Reffye en perçoit clairement les limites pour son problème propre. Dans l'analyse multivariée, l'arbre est en effet représenté à un instant donné par un point au milieu d'un nuage d'autres points qui représentent l'état des autres arbres. C'est ce nuage de points qui est étudié de façon analytique, notamment par des analyses de variance qui font intervenir des minimisations de distances dans cet espace multidimensionnel[2]. Selon de Reffye, c'est cette distance ponctuelle, tout à la fois instantanée et construite dans un espace abstrait qui nous fait perdre de l'information. On y compare des choses qui ne sont pas comparables. Il faudrait au contraire qu'un temps dynamisé prenne en compte un espace hétérogénéisé. La distance abstraite fait violence à la complexité du phénomène spatio-temporel en l'occultant.

Cet argument de la perte d'information est de poids. Il peut toucher juste car il permet de montrer que, dans certains cas, l'outil classique de la biométrie contribue à lui faire escamoter ce qu'elle considère pourtant comme son objet d'étude de prédilection : la variabilité. La biométrie ne serait pas aussi circonspecte qu'on le croit d'ordinaire. Dans certains cas, rester sensible à la variabilité des phénomènes vivants supposerait de renoncer à l'analyse multivariée et à son pouvoir d'abstraction et de condensation. Il faudrait donc représenter plus visuellement et moins abstraitement l'architecture et la croissance de l'arbre. C'est alors que la « visualisation » est ici directement proposée comme alternative à la « ponctualisation », c'est-à-dire à la condensation abstractive qui résulte de l'analyse statistique.

[1] [Reffye (de), Ph. et Snoeck, J., 1976], p. 11.
[2] Analyser et minimiser la variance revient notamment à découvrir les axes d'inertie de ce nuage de points et à exprimer ensuite les données dans ce nouveau référentiel. Voir [Lagarde (de), J., 1995], pp. 21-24.

Essoufflement de la physiologie et des relations d'allométrie traditionnelles

De Reffye évoque alors une solution qui lui paraît aller dans le bon sens et qui peut lui suggérer une piste. Il s'agit de l'approche de J. Herb Beaumont, remontant à une publication déjà ancienne (1939) du *Journal of Agricultural Research.* De Reffye exhume cet article principalement pour justifier la nécessaire hétérogénéisation de la représentation de la plante. En 1939, J. H. Beaumont remplissait la fonction d'« horticulteur principal » auprès de la *Hawaii Agricultural Experiment Station*. Son but essentiel était de rationaliser une pratique alors anarchique sur l'île d'Hawaii afin de mener à des économies d'investissement substantielles : pour la culture du café, à la différence d'autres cultures fruitières, le rôle de la fertilisation n'était pas du tout maîtrisé, ni le recours à l'élagage ni enfin le rôle du climat et de ses variations[1]. Or, l'auteur y montrait qu'il était possible de prévoir la récolte par « l'accroissement global de l'arbre, en tenant compte de la récolte de l'année précédente »[2] :

« Pour ce faire, Beaumont partage l'arbre (C. arabica) en trois zones : la zone des feuilles (celle des accroissements), la zone des fruits et enfin la zone dénudée sans fruit. La durée de chaque zone est d'environ une année. On passe progressivement d'une zone à l'autre par suite de la croissance continue de l'arbre. La méthode d'analyse utilisée est malheureusement trop imprécise (analyse de variance et régression linéaire). »[3]

Un tenant de l'analyse multivariée pourrait en effet penser à ce type de solution pour temporaliser une approche dont on a jugé auparavant qu'elle nous faisait perdre de l'information. Effectivement, qu'est-ce qui empêche l'analyse multivariée de prendre en compte la donnée « temps » aux côtés des autres données ? C'est d'ailleurs en ce sens que l'analyse multivariée peut sembler une technique universelle : elle paraît pouvoir intégrer tout type de paramètre. Mais, là encore, il faut noter que cette temporalisation de l'analyse n'acquiert de valeur pour de Reffye que parce que la représentation de l'arbre y a été en même temps spatialement hétérogénéisée en trois zones fonctionnelles différenciées. C'est pour lui l'essentiel. Avec cette partition en trois zones hétérogènes, le problème de la « distance » abstraite a donc été, non pas résolu, mais pour le moins atténué. C'est ce qui fait que cette solution va dans le bon sens. Toutefois l'analyse de variance y joue encore un rôle nivelant : elle demeure porteuse d'imprécisions. Autrement dit cette méthode est encore non opérationnelle pour l'agronome. Une fois de plus, les méthodes de l'analyse multivariée (l'analyse de la variance, la régression linéaire) sont rejetées car jugées

---

[1] [Beaumont, J. H., 1939], p. 223. L'horticulteur et botaniste J. Herb Beaumont est nommé directeur de la station expérimentale d'Hawaii en 1936. Il sera ensuite reconnu à Hawaii et dans le reste des Etats-Unis pour avoir étudié en 1953 et rapporté d'Australie à Hawaii, puis au département californien de science horticole, une variété d'arbre à noix de Macadamia présentant de grandes qualités ornementales. Sur décision de la « California Macadamia Society », cette variété portera ensuite son nom à partir de 1965.

[2] [Reffye (de), Ph. et Snoeck, J., 1976], p. 11. Voir la conclusion de [Beaumont, J. H., 1939], p. 234 : "[It may be concluded] that the volume of the crop is largely determined by the growth made in the preceding growing and crop season" .

[3] [Reffye (de), Ph. et Snoeck, J., 1976], p. 11. Voir [Beaumont, J. H., 1939], p. 230 : "The best simple expression of the independent relationships of yield on the several estimates of tree growth and size is provided by the partial regression coefficients according to the equation $(y-\bar{y}) = b_l (l - \bar{l}) + b_t (t - \bar{t}) + b_c (c - \bar{c})$ where y = 1937 individual-tree yield of cherry coffee in pounds ; l = 1937 average lateral growth per tree in inches ; t = 1936 average terminal growth of verticals per tree in inches ; and c = sum of the squared circumferences of verticals per tree in 1937 in squared centimeters."

inadaptées : ce qu'il faut c'est une précision plus grande dans l'évaluation des variables et de leurs dynamiques.

En outre, lorsque l'on revient sur le détail de l'article de J. H. Beaumont, il apparaît un autre acquis de valeur que de Reffye ne met pourtant pas en évidence dans sa propre étude mais qu'il n'a pas manqué de relayer dans son travail. En effet, une des tâches que s'était fixé tout d'abord Beaumont a consisté à trouver un moyen de sélectionner les facteurs pertinents parmi les nombreux possibles pour une étude de prévision de récolte adaptée au caféier. Or, dans son tableau de données, il avait mis en concurrence la croissance annuelle de l'arbre avec la section des rameaux verticaux. Pourquoi a-t-il d'abord fait intervenir ce facteur surfacique ? La réponse est évidente. Comme pour de Reffye lui-même dans son premier travail de 1974, cette idée lui a été naturellement suggérée par les recherches sur l'allométrie du végétal très fortement représentées dans les travaux d'horticulture et d'agronomie à partir des années 1925-1930, depuis les travaux de Huxley et Teissier[1]. Dans son inventaire initial, Beaumont cite pas moins de quatre articles s'inscrivant dans cette perspective. Or, rappelons que ce genre de travaux s'appuie principalement sur une approche physiologique axée sur le repérage de relations mathématiques globales et simples entre les dimensions du végétal ou de ses organes. Dans les enquêtes statistiques de l'époque, la circonférence du tronc ou des axes verticaux appartenait donc naturellement à la liste des facteurs impliqués. Par exemple, dès 1921, comme l'indique Beaumont lui-même, un auteur comme J. H. Waring, de la Société Américaine d'Horticulture, avait déjà tenté de mettre en évidence le rôle de la circonférence du tronc dans la production fruitière des pommiers. Or, dès son étude de 1939, Beaumont trouve que ce facteur est très peu corrélé à la production annuelle en fruits. C'est ce résultat qui sera donc retrouvé par de Reffye en 1974 alors même qu'il ignore sans doute encore le travail de Beaumont. En analysant les données de la station expérimentale de Hawaii par une méthode de régression simple puis partielle, Beaumont montre pour sa part qu'il est plus pertinent de s'en tenir à la croissance annuelle évaluée en nombre de rameaux par arbre.

Dans le cas de la production fruitière du caféier, dès 1939, il semble donc clair qu'il est plus important, dans un premier temps, de se référer à la morphologie qu'à la physiologie, à la croissance en longueur de l'arbre et à sa structure qu'à sa croissance en épaisseur. Or, même s'il ne le mentionne pas tel quel, ce résultat (qu'il avait lui-même retrouvé) a conditionné l'approche de de Reffye dans la mesure où, comme nous allons le voir, ce dernier va explicitement s'en tenir à la seule estimation de l'accroissement du nombre de rameaux pour évaluer la production en cerises. En effet, il ne s'autorise à négliger les facteurs physiologiques habituellement pris en considération que parce qu'auparavant Beaumont et lui-même ont montré qu'ils étaient faiblement corrélés à la production fruitière dans le cas particulier du caféier.

Pour ces deux dernières raisons (imprécision de toute analyse de variance, essoufflement des modèles allométriques), Reffye se décide donc à concevoir pour chaque arbre une représentation dynamique continue. Or un simple relevé annuel lui semble devoir encore trop contribuer à cette déperdition d'informations qu'il redoute. Sur une période d'une année, un grand nombre d'événements architecturaux interviennent selon un échéancier très enchevêtré. La seule manière de les prendre tous en considération consiste à « élaborer un modèle mathématique continu de la croissance du caféier »[2]. Ainsi aucun événement important de cette croissance et de cette architecture ne pourra échapper à l'agronome. Il faut donc comprendre que, dans le cas des caféiers, il n'y a pas de critère simple servant à prédire le comportement de l'arbre. Si l'on veut prédire un comportement, le seul marqueur valable est donc l'arbre lui-même, tout entier, pris dans

[1] Voir la littérature citée par [Beaumont, J., H., 1939], p. 223 et rapportée dans sa bibliographie page 235.
[2] [Reffye (de), Ph. et Snoeck, J., 1976], p. 11.

son histoire morphologique. Ainsi ce qu'il faut, selon de Reffye, c'est donc bien considérer toute la vie de l'arbre puisqu'il est en perpétuelle évolution. Le modèle mathématique, à partir de ce moment-là, ne devra plus reposer uniquement sur les outils abstractifs standardisés de l'analyse statistique. C'est précisément là que la simulation va s'imposer.

Visualisation et abstraction

Avant d'en passer à cette décision pour la simulation proprement dite, il nous faut revenir un moment sur un terme qu'emploient de Reffye et Snoeck dans l'article de 1976. Il peut paraître choquant dans un article de mathématiques appliquées. Il s'agit du terme « visualisation ». Il est possible d'en éclairer dès maintenant le sens ainsi que le type de rapport qu'il entretient à la technique de simulation qui sera préconisée. Dans la fin de l'introduction de l'article de 1976, de Reffye et Snoeck reviennent sur la véritable alternative qu'ils évoquaient déjà dans notre avant-dernière citation : la « visualisation ». Qu'est-ce qu'ils entendent par là ? Alors que dans ce premier passage, l'appel à la visualisation ne semblait pas automatiquement imposer une visibilité effective, puisqu'il s'agissait seulement de renvoyer à une méthode mathématique alternative susceptible de faire éclater de nouveau en ses diverses dimensions le « point » statistique représentatif qui s'était rendu coupable d'avoir trop condensé et écrasé l'information[1], dans la fin de l'introduction, c'est bien la visualisation effective, concrète, sans détour, qui est proposée telle quelle : le traçage des arbres par ordinateur sur une table traçante. Cependant les auteurs prennent la peine d'indiquer qu'elle n'est pas le but final du travail de recherche, mais qu'elle n'en est qu'un « corollaire ». Ce corollaire est néanmoins conçu lui-même comme un moyen d'accréditation supplémentaire de l'approche modéliste et synthétique nouvelle qu'il va présenter :

« Comme corollaire, on devrait pouvoir préciser le modèle au point d'envisager le traçage automatique du caféier à chaque instant de sa vie à l'aide d'un ordinateur qui aurait reçu et intégré les données de la croissance et du développement de l'arbre. »[2]

Donc de Reffye et Snoeck prennent bien garde de ne pas en appeler directement à notre expérience perceptive et commune en tant que telle, c'est-à-dire en tant qu'elle serait réputée plus précise que les approches abstractives. Ils n'utilisent donc pas directement l'argument de l'imprécision de l'abstraction. Quand bien même de Reffye en particulier aurait conscience de commencer à donner un autre rôle aux mathématiques dans les modèles, il ne lui est pas possible d'attaquer de front les pouvoirs séculaires qui ont été conférés à l'abstraction *via* les mathématiques. Souvenons-nous que, dans ses études, il a toujours été séduit par la mise en équation des phénomènes en ce qu'elle vaut comme résumé à la fois abstractif et objectif de la diversité des phénomènes. En tout état de cause, et si on lit bien le texte de 1976, de Reffye tient à insister ici sur l'interprétation inverse : c'est en cherchant à être plus précis dans nos modélisations mathématiques qu'il nous est secondairement, mais significativement, possible d'en venir à une visualisation effective et techniquement assistée par ordinateur.

---

[1] La dialectique du point représentatif et de la surface spatialisée est une métaphore très ancienne dans l'histoire des théories de la connaissance et de la représentation. Voir [Köhler, P., 1912], *passim*. Elle a été brillamment mise en œuvre dans l'épistémologie métaphysique de Leibniz car elle fait corps avec le système philosophique tout entier. C'est en général ce genre de métaphores empruntées à la géométrie projective qui dominent encore les analyses de l'époque moderne et contemporaine sur la question de la connaissance humaine et de son pouvoir abstractif. Bachelard lui-même y a encore eu recours. Voir [Bachelard, G., 1928, 1973], pp. 17-18.

[2] [Reffye (de), Ph. et Snoeck, J., 1976], pp. 11-12.

Que faut-il conclure de cela ? D'une part, de Reffye, en toute conscience, mène un combat contre les statistiques qu'il accuse de se livrer à des manipulations parfois insignifiantes. Or il mène ce combat au nom de l'idéal, peut-être déjà périmé à son époque (mais régulateur chez lui), de l'objectivité d'une loi mathématique optimale, de son enracinement dans le réel : c'est ce qu'il appelle se donner un « modèle » mathématique. D'autre part, ce faisant, mais cette fois-ci involontairement, son action a une conséquence qui se trouve être en léger porte-à-faux par rapport à ce qu'il pense qu'elle fait[1] : elle ne contribue pas spécialement ni immédiatement à valoriser la recherche de lois mathématiques précises et objectives ; bien plutôt elle modifie le rôle cognitif des mathématiques dans l'entreprise de modélisation en les faisant passer d'une utilisation analytique à une utilisation synthétique. Le modèle de simulation de la croissance de l'arbre incarnera en fait une telle rupture de manière exemplaire.

Par ailleurs, dans l'article de 1976 qui présentera ce modèle, les choix techniques seront en permanence justifiés au regard de l'objectif prioritaire qui est celui de la précision. Ce n'est donc pas l'efficacité qui est directement invoquée pour la conception de ce nouveau genre de modèle mais une qualité du modèle qui se trouvera entraîner avec elle celle que recherche spécifiquement l'agronome. La précision est ici supposée apporter, par surcroît, la vertu d'adapter le modèle à un usage opérationnel. Ce que nous savons de de Reffye nous permet de dire qu'il ne peut pas s'agir ici pour lui d'une « stratégie » de façade qui viserait à masquer de façon cynique sous les dehors du savant désintéressé le caractère en fait purement pragmatique car agronomique de sa véritable motivation. Il ne travaille et il ne fait les choix qu'il fait que parce qu'il n'y a pas que cette motivation pragmatique qui l'anime, même si, au final, c'est bien elle qui habite, en revanche, l'institution qui l'abrite.

On ne saurait comprendre les choix ultimes de cet acteur jusque dans le détail du travail de ses recherches sans les rapporter aussi à son idéal scientifique propre. Une lecture purement sociologique serait ici nivelante voire fausse pour l'essentiel. Car dans cet article, il nous est donné de constater que, de son point de vue, c'est au nom de la précision du savoir scientifique qu'il faut travailler à modifier les solutions de ses prédécesseurs. On ne peut comprendre ses choix que si on se les représente aussi dans un contexte autre que purement stratégique. C'est précisément la raison pour laquelle sa philosophie du travail scientifique entendu comme recherche de lois mathématisées de la nature peut se conjoindre à un objectif qui, à l'échelle institutionnelle et sociale, est, il est vrai, tout autre.

Première modélisation fractionnée : l'approche cinétique du caféier

La question est donc ici la suivante : à quel type de modélisation son épistémologie comme les limites techniques qu'il a reconnues le conduisent–elles ? Dans le modèle de 1975-1976, de Reffye veut suivre la formation et la croissance des rameaux du caféier. Pour cela, il choisit de se proposer un modèle mathématique qui soit capable de prédire pour chaque instant futur le *nombre de rameaux formés.* C'est alors seulement qu'il sera possible d'en extraire le *nombre de rameaux porteurs de fruits*.

Le caféier, à partir d'une tige principale poussant verticalement (elle est dite « orthotrope »), donne naissance de proche en proche à des rameaux qui, pour leur part, croissent dans une

[1] Voilà le genre de distorsion qui peut exister entre les motivations conscientes des acteurs et les conséquences effectives de leurs actes ; ce qui ne peut être accessible que d'un point de vue historique et compréhensif. On en peut saisir ici un cas exemplaire. Tel est aussi un des facteurs, difficilement réductibles, de la contingence des faits historiques.

direction sensiblement horizontale (ils sont dits « plagiotropes »). Or, avant toute chose, de Reffye s'appuie sur le fait, bien connu en botanique, qu'il est possible de distinguer l'étape de formation de celle de la croissance du rameau. C'est en vertu de cette importante considération qu'il lui paraît possible de faire estimer au modèle le nombre total de nœuds plagiotropes d'un arbre à chaque instant. En effet, grâce à la prise en compte de cette relative dissociation entre le processus de formation des étages plagiotropes et le processus de leur croissance, la procédure de modélisation mathématique peut se simplifier puisqu'elle peut *se décomposer* elle-même en deux étapes dont chacune est modélisable plus simplement. Attention à bien comprendre que ce n'est pas la modélisation elle-même qui est ici simplifiée au sens où elle serait simplificatrice. Elle est seulement plus simple à réaliser ; ce qui est différent. Elle serait simplificatrice si elle faisait abstraction de certains détails. En fait, quand nous disons qu'elle est simple, nous voulons dire qu'elle est *plus simple à fabriquer* à partir du moment où elle choisit de « coller » opportunément à la dissociation entre divers processus telle qu'elle est présente dans les phénomènes réels eux-mêmes.

À la différence de l'approche des biométriciens classiques, ce qui est simplifié ici, c'est donc la procédure de réalisation du modèle, mais pas le modèle total résultant ni donc la représentation de la réalité. Voilà précisément là où peut servir l'ordinateur. Car en cette année 1976, il devient possible de fabriquer le modèle mathématique total, étapes par étapes, sans qu'il soit conçu *a priori* dans sa formulation totale résultante, parce qu'un calculateur automatique programmable est à la disposition de l'agronome modélisateur. Simplifier ainsi la procédure de confection pas à pas du modèle conduit à un modèle résultant complexe mais susceptible d'être supporté par l'infrastructure informatique. La mise à disposition d'un nouvel outil de calcul, plus puissant et programmable, contribue donc ici au déploiement d'un type de modélisation axé principalement sur la morphologie, cela au rebours des approches statistiques traditionnelles axées sur la physiologie. Le calculateur peut ainsi présider à la recombinaison pas à pas de ces sous-modèles conçus par les scientifiques séparément et de façon découplée ou fractionnée. Le modèle, de mathématique qu'il était, peut devenir alors logico-mathématique. Nous verrons dans quelles circonstances exactes l'IFCC a pu opportunément bénéficier d'un matériel informatique à cet effet. Retenons pour l'instant ce fait fondamental que de Reffye et Snoeck décident d'utiliser cette *dissociation* dans les processus biologiques pour procéder par étapes dans la constitution de leur modèle complexe, pour la *fragmenter*.

Après avoir exprimé ce projet de modéliser par phases successives les étapes mêmes du processus réel, les deux auteurs remarquent que, par des mesures sur un grand nombre d'arbres, il est tout d'abord possible d'estimer l'intervalle de temps moyen ΔT nécessaire à la formation d'un étage plagiotrope à un instant T donné. Cet étage étant créé, il devient possible également et dans un second temps (pour le calcul), d'estimer les paramètres de la fonction de croissance du rameau standard à cet étage. Ainsi, en composant ces deux fonctions de modélisation par le calcul automatique et grâce à des branchements logiques conditionnels traités par le langage informatique, on devrait pouvoir reconstituer le nombre total de nœuds plagiotropes présents sur un arbre à un instant T donné.

La modélisation de la formation des rameaux : les hypothèses

Sous quelle forme précise ces fonctions de modélisation se présentent-elles et comment de Reffye et Snoeck les justifient-ils ? Tout d'abord, pour ce qui est de la modélisation de la formation des étages ou rameaux, ils partent de considérations qualitatives faites à partir de l'observation

d'une courbe empirique simple : l'accroissement annuel en nombre d'étages plagiotropes d'un arbre moyen. C'est à partir d'elle que les hypothèses menant aux fonctions mathématiques modèles vont être suggérées. Avant cette modélisation, il y a donc d'abord une phase d'observation en vue de produire des hypothèses. Mais ce que les auteurs observent n'est que la simple allure de l'évolution de certaines données bien précises. Il faut remarquer que leur choix de la forme fonctionnelle du modèle mathématique ne s'appuie ici sur aucune heuristique explicite ni systématique mais seulement sur un coup d'œil, une culture mathématique personnelle ou bien encore sur l'invocation vague de travaux antérieurs portant sur la modélisation de phénomènes biologiques similaires[1]. Cependant de Reffye et Snoeck n'observent pas n'importe quoi puisqu'ils ne choisissent d'observer que les données intermédiaires (le nombre d'étages créés à un âge donné) dont ils ont déjà supposé (de façon crédible d'un point de vue biologique) qu'elles pourraient donner lieu à une modélisation simplifiée et par étapes[2]. Or, cette courbe de mesures montre d'une part que le nombre d'étages plagiotropes qu'un caféier fabrique ne dépend que de son âge : il est donc possible de faire abstraction des variations climatiques. Cela est une hypothèse d'autant plus valable que la Côte-d'Ivoire subit un climat tropical qui ne connaît que peu de variations. Pour accréditer davantage encore leur hypothèse, les auteurs s'appuient sur le fait que l'expert caféiculteur l'utilise tous les jours implicitement, mais en sens inverse, notamment lorsqu'il parvient à estimer l'âge d'un caféier à partir de sa croissance annuelle, c'est-à-dire à partir du nombre de ses derniers étages formés. Cette première hypothèse serait ainsi d'autant plus crédible qu'elle explicite un savoir expert enfoui dans la compétence implicite du caféiculteur. Modéliser impose donc, entre autres choses, d'expliciter l'implicite de certains savoirs experts non encore discursivement accessibles[3].

Mais, d'autre part, la forme de cette courbe empirique est, elle aussi, très instructive. C'est elle qui va suggérer le type de la fonction mathématique modèle, c'est-à-dire la deuxième hypothèse. Si on l'interpole, la forme de cette courbe discrète est très proche de celle d'une sigmoïde continue (ou courbe en S). On y distingue en effet « une phase initiale accélérée, une phase linéaire intermédiaire et une phase finale ralentie »[4]. Cela n'a rien de surprenant, là non plus, car il s'agit de la forme classique que prennent les fonctions de croissance d'un organisme végétal lorsqu'il n'est pas perturbé. Or ce type de courbe peut être indirectement représenté par une fonction mathématique explicitement constructible : la dérivée d'une courbe sigmoïde est une courbe en cloche. Ce sont ces types de courbe en cloche (les fonctions eulériennes de type B) dont les mathématiciens connaissent de façon explicite les fonctions de densité et qu'ils peuvent donc nous permettre de calculer. Or, il est important de noter que c'est précisément dans le fait que l'on dispose de formulations mathématiques explicites pour ces fonctions modélisatrices que de Reffye et Snoeck voient la légitimité qu'il y a désormais à dire que l'on « simule » l'arbre :

---

[1] C'est notamment le cas pour le modèle sigmoïde qu'ils vont s'autoriser à reprendre. Sans référence précise faisant autorité, ils invoqueront seulement, et en général, les études antérieures sur la temporalité des phénomènes de croissance. Rappelons que ces travaux classiques sur la forme sigmoïde remontent au 19ème siècle, notamment à la loi de Verhulst. Voir [Lotka, A. J., 1925, 1956], pp. 69-71.

[2] Cette dissociation des processus est donc bien en quelque sorte la première hypothèse ou hypothèse fondamentale de la modélisation dissociée puis informatiquement recombinée qui va suivre.

[3] Cette expérience de clarification des concepts et des notions par la reformulation pour l'ordinateur a été souvent faite par les concepteurs de systèmes experts dans tous les domaines. Pour la biologie, voir notre entretien avec Alain Coléno, |Coléno, A. et Varenne, F., 2001].

[4] [Reffye (de), Ph. et Snoeck, J., 1976], p. 13.

« Il est intéressant de pouvoir ajuster les courbes observées à des courbes mathématiques afin de pouvoir reconstituer la croissance d'une façon continue*,* c'est-à-dire la simuler*. »*[1]

Dans cette première étape de la modélisation de 1976, la « simulation » est donc d'abord comprise par de Reffye et Snoeck comme une reconstitution intégrale d'un phénomène continu par une équation mathématique explicite, exprimable elle-même sous une forme close. Dans cette première étape, simuler, c'est reconstituer continûment la dynamique du phénomène. Or, pour ce suivi continu, de Reffye pense d'abord et avant tout à un suivi mathématique fonctionnel continu, c'est-à-dire d'abord à une fonction analytique, ce dernier terme étant pris au sens de l'analyse mathématique. Cela est important à signaler car nous verrons par la suite que cette interprétation étroite des termes « simulation » et « simuler » va souffrir de quelques gauchissements cruciaux qui feront qu'à la fin de l'article, les termes seront conservés alors même que l'on n'aura plus à faire à un modèle mathématique fonctionnel pur mais à un modèle composite.

Par ailleurs, notons que lorsque de Reffye affirme qu'il nous est permis d'interpoler ici la fonction de croissance, il insère également une hypothèse simplificatrice (la troisième donc) qui consiste à dire que l'on peut représenter sans dommages de façon continue le phénomène discontinu de formation des étages. De Reffye est conscient du caractère hypothétique de cette affirmation. Mais cette hypothèse lui est essentielle s'il veut pouvoir se donner un type de fonctions mathématiques suffisamment régulier pour permettre que des manipulations mathématiques sur ces fonctions nous acheminent ensuite vers une solution calculable. C'est bien le cas des fonctions sigmoïdes dont il faut d'abord supposer qu'elles sont continues pour pouvoir passer à la dérivée. C'est pourquoi le modèle général pourra être qualifié de « modèle mathématique continu ».

Pour finir sur les hypothèses, on voit donc déjà que, quelle que soit l'issue de cette tentative de modélisation, il serait bien évidemment faux de dire qu'elle ne simplifie aucunement les phénomènes pour parvenir à les représenter. Il y a d'abord l'hypothèse que la croissance moyenne ne dépend que de l'âge ; il y a ensuite l'hypothèse de la forme sigmoïde de la courbe de croissance ; il y a enfin l'hypothèse que cette courbe peut être traitée sous sa forme continue sans dommages. Pour de Reffye, modéliser la croissance de l'arbre continûment et au plus près, ce n'est donc certes pas se priver tout à fait d'hypothèses simplificatrices, mais c'est d'une part changer le niveau biologique auquel on s'autorise à insérer ces hypothèses. C'est faire des hypothèses à un niveau biologique inédit par rapport aux hypothèses classiques de l'analyse multivariée. Et, d'autre part, c'est se défaire des hypothèses fréquentes mais rarement explicitées ni rappelées qui soutiennent toutes les analyses de variance : que ce soit l'hypothèse d'indépendance et de pure additivité[2] des différents facteurs ou même l'hypothèse de faible interaction des facteurs. En effet, l'apport de l'analyse de variance est quasi nul lorsque les interactions entre facteurs, c'est-à-dire en fait les non-linéarités, sont significatives car l'interprétation des résultats et leur utilisation deviennent très délicates[3]. Modéliser directement par

[1] [Reffye (de), Ph. et Snoeck, J., 1976], p. 14. C'est nous qui soulignons.

[2] Voir [Cox, D. R., 1958], chapter 2, pp. 15-22. Dans ce chapitre, l'auteur analyse et énumère les trois « hypothèses clés » nécessaires à la bonne tenue d'un plan d'expériences statistiques : additivité des traitements, constance des traitements, non interférence des traitements d'une unité (ou d'un bloc expérimental) avec le comportement d'une autre unité. Voir la note suivante pour la question de l'additivité.

[3] On peut se référer sur ce point à [Vessereau, A., 1947, 1988], p. 196 : « Cette hypothèse [d'additivité] se résume en disant qu'*il n'y a pas d'interaction* A*B entre les effets des facteurs contrôlés A et B. En d'autres termes, le facteur A par exemple n'agit pas différemment suivant la façon différente dont agit de son côté le facteur B (variantes B1, B2, …) ; A et B interviennent indépendamment l'un de l'autre et leurs effets s'ajoutent purement et simplement. » [C'est l'auteur qui souligne.] Voir également [Lagarde (de), J., 1995], p. 131 : pour procéder à une analyse de variance simple, « l'effet

des fonctions complexes au lieu de pratiquer une analyse de variance revient à se donner des hypothèses de modélisation multiples et diversifiées. C'est se libérer des hypothèses contraignantes communes aux modèles statistiques en s'en forgeant certes d'autres, mais plus librement et de façon plus souple[1].

Le sous-modèle de la formation des rameaux

Travaillant donc dans cet esprit, et ayant fait l'hypothèse que l'on peut considérer avoir affaire à une fonction eulérienne de type B, de Reffye et Snoeck montrent ensuite que l'on peut exprimer analytiquement $\Delta N/\Delta T$, à savoir l'accroissement mensuel du nombre d'étages plagiotropes, en fonction de l'âge du caféier, T, et de sa durée de vie, T_0, exprimés en mois:

$$F(T) = \Delta N/\Delta T = K (T)^p (T_0-T)^q$$

Dans cette formule, K, p et q sont des coefficients inconnus mais à estimer par ajustement, c'est-à-dire par un recours aux courbes empiriques. Cela est possible par une simple régression linéaire une fois que l'on a linéarisé la formule précédente de la façon suivante (en supposant ici que ΔT = 1 mois) :

$$\text{Log } \Delta N = \text{Log } K + p \text{ Log } T + q \text{ Log } (T_0-T)$$

Remarquons que cette propriété de linéarisation figure là aussi parmi les grands avantages de ce modèle mathématique si l'on vise, comme c'est le cas ici, une application opérationnelle. La valeur de l'ajustement des coefficients K, p et q sur les données mesurées est ensuite estimée par de Reffye au moyen du coefficient de régression qui se trouve être très bon (R^2=0.995). On peut alors exprimer explicitement le nombre total d'étages que peut former le caféier :

$$N_0 = \frac{K(T_0)^{p+q+1} * p! * q!}{(p+q+1)!}$$

---

global doit être égal à la somme des effets individuels ». D'où la fréquente construction de modèles mathématiques purement additifs pour représenter les effets des facteurs contrôlés. Dans le cas où l'on fait néanmoins intervenir les interactions, on le fait sous la forme de multiplication des contributions des facteurs contrôlés (A*B). Il en résulte un problème majeur d'interprétation des résultats. Voir [Vessereau, A., 1947, 1988], p. 298 : « Il est souvent préférable, dans des cas aussi complexes, de renoncer aux avantages théoriques que présente la décomposition systématique de la somme des carrés Q_T [termes carrés des effets de l'interaction A*B], et de tester directement telles hypothèses particulières dont on désire prouver la validité. » Autrement dit, quand les phénomènes sont fortement non-linéaires et qu'il intervient des termes quadratiques, il faut les modéliser au lieu d'analyser la variance de leurs facteurs.

[1] Dans la plupart des cas de modélisation, cela peut sembler un coup de poker que de se donner *a priori* la forme fonctionnelle précise du modèle, de surcroît non-linéaire, pour en estimer ensuite directement les paramètres sans même se poser auparavant la question de la pertinence de cette forme elle-même. À partir des années 1950, les développements en probabilité, principalement sous l'impulsion de recherches en reconnaissance de formes, vont d'ailleurs proposer des techniques d'estimation de la forme fonctionnelle du modèle dans le cadre de ce que l'on a appelé l'analyse non-paramétrique. Or, ce problème n'est pas posé par nos auteurs. Mais remarquons justement que, dans le cas qui les occupe, s'il y a bien un *a priori*, il a plutôt joué en amont, c'est-à-dire avant la suggestion de la forme du modèle, sous la forme d'une connaissance biologique particulière (qui dans un autre contexte aurait pu sembler de peu d'importance) : les auteurs se sont appuyés sur des connaissance botaniques et biologiques précisément afin de trouver de quoi fractionner précisément le phénomène réel en étapes favorables à la modélisation, c'est-à-dire susceptibles de suggérer d'elles-mêmes assez facilement et intuitivement (sans gros coup de poker donc) des formes de modèles simples, bien que non-linéaires. La capacité qu'ont les auteurs à exprimer ces sous-modèles sous des formes fonctionnelles *a priori* simples dépend donc en fait directement du choix antérieur du fractionnement lui-même.

Cependant, il faut le noter, cela est sans intérêt immédiat puisqu'il nous faudrait pouvoir évaluer précisément l'âge de *chacun* des nœuds des étages plagiotropes afin de leur appliquer leur propre fonction mathématique de croissance. Il faut donc en rester à un niveau plus fin si l'on veut évaluer le nombre de nœuds fructifères sur un arbre à un âge donné.

Pour le moment donc, nous sommes seulement à même de déterminer le nombre d'étages créés par mois à un âge donné. Or, on cherche à connaître le nombre total d'étages plagiotropes à un âge fixé pour pouvoir *ensuite* les faire pousser un à un à partir de leur date d'apparition. Il faut donc d'abord exprimer le laps de temps qui est nécessaire pour qu'un nouvel étage apparaisse à un âge donné et sommer ensuite tous ces laps de temps élémentaires valables à chaque instant T(i) jusqu'à obtenir T, l'âge du caféier :

$$T = \Sigma \ \Delta T(i) = \Sigma \ F^{-1} (T(i))$$

Il faut donc prendre l'inverse de la fonction explicite F(T) précédente (F^{-1} (T) ou 1/ F(T)) et additionner à de nombreuses reprises les valeurs numériques qu'elle prend aux différents moments auxquels apparaît un nouvel étage. Or, c'est ce type de calcul itératif qui commence à exiger le recours à un calculateur :

« Le cumul des ΔT ne peut s'effectuer qu'avec un calculateur. »[1]

Le calcul de la croissance orthotrope est décomposé et se fait pas à pas car il n'y a plus d'expression mathématique explicite et simple. L'ordinateur est ici exigé en ce qu'il permet de calculer à chaque moment le laps de temps qu'il faut pour qu'un autre événement (à savoir la formation d'un étage plagiotrope supplémentaire) intervienne, cela jusqu'à l'âge T qui nous intéresse ; et, ce faisant, son programme empile dans une variable N (N = N+ 1 à chaque passage) le nombre de fois où il a fait ce calcul. Le nombre N obtenu au final, c'est-à-dire lorsque le programme s'arrête, correspond bien au nombre total d'étages plagiotropes du caféier à l'âge T.

Pour de Reffye et Snoeck, cet organigramme intermédiaire a l'intérêt de simuler la croissance orthotrope telle qu'elle se manifeste réellement dans l'arbre : par étapes et par laps de temps successifs. Malgré un fondement mathématique continuiste dans les fonctions des modèles élémentaires ou sous-modèles, on trouve là une possibilité de discrétiser de façon réaliste les événements de croissance puisqu'on n'exprime pas le nombre d'étages en fonction du temps mais, au contraire, le laps de temps qu'il faut pour qu'un étage se crée. C'est la première entorse à leur première interprétation de la notion de « simulation » telle que nous l'avions vue précédemment.

De façon significative, les auteurs adoptent donc un point de vue tout à la fois plus historique et plus proche du travail de « décision » attribué à l'arbre en tant qu'il est un acteur de sa croissance. C'est le moyen le plus simple selon eux si l'on veut pouvoir poursuivre la modélisation en traitant ensuite mathématiquement la croissance de ces étages formés puisqu'il sont désormais précisément situés temporellement, c'est-à-dire du point de vue de leur origine temporelle. Les auteurs se sont ainsi créé la possibilité d'avoir ces données temporelles intermédiaires (les dates de formation de chacun des étages plagiotropes). Ils ont synthétisé des données en quelque sorte. Elles sont en effet cruciales pour l'estimation du nombre de nœuds fructifères, comme nous le verrons.

[1] [Reffye (de), Ph. et Snoeck, J., 1976], p. 15.

La simulation procède donc ici par modèles d'abord découplés de façon à se créer des données intermédiaires qui soient elles-mêmes traitables par un deuxième modèle mais plus précisément que les seules données du problème accessibles immédiatement par la mesure. De plus, la validation du modèle se fait ici par étapes, comme sa constitution et en même temps qu'elle. En effet, le premier modèle mathématique peut être validé séparément, à l'étape à laquelle nous en sommes pour le moment, c'est-à-dire avant même que la synthèse finale entre les deux modèles mathématiques ne soit faite. Cela est dû à la propriété qu'ont les données intermédiaires créées par le premier modèle (ici le nombre d'étages plagiotropes formés par unité de temps) de correspondre à des observables biologiques susceptibles de conduire à d'éventuelles invalidations patentes du modèle partiel. Même si, en lui-même, il n'intéresse pas directement la résolution du problème posé, le premier modèle partiel ou sous-modèle se présente donc comme validé de façon autonome.

Le sous-modèle de la croissance des rameaux et l'organigramme intégrateur

Poursuivons sur ce point afin de saisir comment les auteurs décident ensuite de coupler concrètement leurs modèles mathématiques partiels. Car, avant de reconstituer une représentation totale de la croissance et de l'architecture de l'arbre, il nous faut auparavant avoir un modèle de *croissance* des étages plagiotropes dès lors que l'on connaît déjà un modèle de leur *formation*. Il s'agira d'un deuxième modèle partiel dont on peut considérer que son action mathématique suivra, dans le temps du calcul, l'action du premier : le découpage du modèle général en modèles partiels suit la chronologie même des phénomènes biologiques réels. Pour ce deuxième modèle, de Reffye et Snoeck vont procéder d'une façon similaire à celle qu'ils avaient adoptée pour la modélisation de la formation des étages. Ils vont tout d'abord avoir une approche observationnelle sur un grand nombre d'étages plagiotropes. Dessinant la courbe du nombre de nœuds formés en fonction du temps, ils constatent que l'on peut la modéliser de façon vraisemblable par un modèle mathématique simple de la forme suivante :

$$g(t) = n_0 (1 - e^{-rt})$$

où « n_0 est le nombre maximal de nœuds que peut atteindre un plagiotrope et r un paramètre mesurant la vitesse de croissance »[1]. La seule justification qu'ils apportent ici s'exprime dans l'affirmation que c'est, selon leur propre terme, la forme de la courbe observée qui leur a « suggéré »[2] ce type de modèle. De même, en linéarisant comme précédemment, c'est-à-dire par passage au logarithme, il leur est possible de trouver, par régression, un ajustement qui s'avère tout à fait « excellent » selon leurs dires. Ainsi trouvent-ils, pour le clone dit 182 de *Coffea Robusta*, une fonction g (t) qui exprime le nombre de nœuds émis par unité de temps sur un étage plagiotrope donné. Mais tous les nœuds formés ne sont pas fructifères. À chaque instant il faudrait donc pouvoir déterminer combien parmi les nœuds formés sont réellement fructifères.

Dès lors apparaît une étape au cours de laquelle les auteurs font intervenir un certain savoir botanique d'observation. Comme pour l'hypothèse de dissociation des processus de formation et de croissance des étages plagiotropes, ce savoir botanique reste cependant relativement élémentaire. On peut en effet considérer qu'après leur formation et au cours de leur croissance, les étages plagiotropes passent successivement par trois phases distinctes : les

[1] [Reffye (de), Ph. et Snoeck, J., 1976], p. 18.
[2] [Reffye (de), Ph. et Snoeck, J., 1976], p. 18.

nœuds produits portent des feuilles, ensuite ils entrent dans une phase pendant laquelle ils sont fructifères, enfin ils se dénudent. Sur un même rameau, il y a donc trois zones : une zone à nœuds feuillus qui se trouve au bout du rameau, une zone à nœuds dénudés située à la base du rameau et une zone à nœuds fructifères située entre les deux. Or, d'après les relevés disponibles, il est possible d'estimer la durée de vie d'une feuille ainsi que celle d'un nœud fructifère. Tout nœud qui apparaît au bout du rameau se présente d'abord comme pourvu de feuilles. Il le sera jusqu'à un certain temps t_0 qui est la durée de vie moyenne d'une feuille. Donc, sur un même rameau plagiotrope, le nombre total de nœuds portant des feuilles à l'instant t est :

Si $t \leq t_0$: $n_{feuilles} = g(t)$

Si $t > t_0$: $n_{feuilles} = g(t) - g(t-t_0)$

Par la suite, les nœuds fructifères étant « également bornés dans le temps entre un temps minimal d'apparition t_1 et une durée de vie maximale t_2 », « il y a trois possibilités en ce qui concerne le rameau de rang k, d'âge T - $\sum_{1}^{k} \Delta T_i$ = t »[1] :

Si $t < t_1$: $n_{fructifères} = 0$ (le rameau ne porte que des feuilles)

Si $t_2 > t > t_1$: $n_{fructifères} = g(t-t_1)$

Si $t > t_2 > t_1$: $n_{fructifères} = g(t-t_1) - g(t-t_2)$

D'après les observations faites sur les arbres réels, les auteurs estiment qu'en moyenne :

t_0 = 10 mois, t_1 = 6 mois et t_2 = 19 mois[2].

Il leur est donc possible d'écrire ces équations de façon chiffrée. Les modèles mathématiques partiels sont au final tous intégralement interprétés[3]. Il est possible aux auteurs de proposer ce qu'ils appellent significativement une « Synthèse globale de la croissance du caféier » :

« En recombinant les instructions de croissance de la tige et des rameaux, on obtient en quelque sorte le programme de la croissance et du fonctionnement génétique et physiologique de l'arbre. Ce programme peut se mettre sous trois formes équivalentes, bien que très différentes :

a) organigramme du programme de croissance,

b) architecture de l'arbre à l'instant T,

[1] [Reffye (de), Ph. et Snoeck, J., 1976], p. 17. Le rappel sur les ΔT a pour fonction de nous préparer ici à intégrer les nombres de rameaux dans l'organigramme général de traitement de la croissance, c'est-à-dire dans le traitement combiné du second modèle partiel par le premier modèle partiel.

[2] [Reffye (de), Ph. et Snoeck, J., 1976], pp. 18-19.

[3] Nous simplifions ici les réflexions. Les auteurs traitent également du cas où le rameau plagiotrope ramifie à son tour ([Reffye (de), Ph. et Snoeck, J., 1976], pp. 20-22). Ce qui intervient pour le clone *Robusta* 126. Mais cette complication ne change pas l'esprit de la méthode adoptée et peut donc être mise de côté sans grand dommage pour notre exposé.

c) graphe théorique des courbes de rendement. »[1]

Ce passage présente l'intérêt de fournir un grand nombre d'indices sur l'état d'esprit nouveau dans lequel les auteurs ont fait ce travail de modélisation. Tout d'abord, le processus biologique de croissance et de mise en place de l'architecture est explicitement assimilé à un « programme » de calculateur qui aurait ainsi à exécuter un certain nombre d'« instructions » successives. De ce fait, le modèle semble ici ne plus se réduire aux expressions mathématiques convoquées, aux calculs, mais il s'étend à l'ensemble des instructions du calculateur automatique programmable, c'est-à-dire au programme informatique tout entier. Or notons bien qu'il s'agit ici de beaucoup plus que d'une simple métaphore issue de cette vogue pour la cybernétique qui a été propre à la biologie des années 1960-1970. En effet, dans ce cas de figure, il est incontestable que le programme existe et qu'il n'est donc pas une spéculation ni une idée régulatrice. Certes, c'est une construction humaine. En ce sens, il s'agit d'un artefact. Mais c'est le résultat à la fois tangible et opérationnel de cette recherche. Et les auteurs sont donc naturellement tentés de passer de l'analogie à l'identification puisque ce programme informatique est un simulateur dès lors qu'il reconstitue chaque étape biologiquement significative de la croissance de l'arbre. Le terme « simulation » désigne le fonctionnement total du modèle mixte ou composite et non plus seulement le calcul approché d'une fonction mathématique explicitée. La « simulation » est une reconstitution car l'organigramme reconstitue pas à pas la mise en place des étages plagiotropes ainsi que celle des entre-nœuds qui croissent sur ces étages.

Organigramme simplifié de la « synthèse globale de la croissance du caféier »

Programme du modèle mathématique continu (1976)[2]

1 - au début du programme, on entre l'âge final T de l'arbre.

2 – **Formation du rameau :** avec la fonction F(t), le programme calcule le temps qu'il a fallu pour que le premier rameau ou le rameau suivant se forme. L'âge courant t de l'arbre est alors incrémenté de ce laps de temps. L'âge du rameau courant va donc être T-t.

3 – **Etat de croissance du rameau :** ensuite, deux solutions sont possibles : si $T-t < t_1$, le rameau est trop jeune et ne porte que des feuilles, le programme s'arrête car tout autre rameau qui pousserait serait désormais plus jeune donc sans fruits également ; sinon il y a encore deux sous-possibilités : si $T-t < t_2$ alors $\Delta n_{fructifères} = g(T- t-t_1)$ (le rameau est trop jeune pour qu'il s'y trouve des nœuds dénudés), sinon $\Delta n_{fructifères} = g(T-t-t_1) - g(T-t-t_2)$[3] (ce sont des nœuds assez vieux mais aussi assez jeunes qui sont fructifères et il y a donc des nœuds dénudés),

4 - ensuite le programme incrémente le nombre courant de nœuds du $\Delta n_{fructifères}$ calculé précédemment, et il incrémente le nombre courant de rameaux de 1 **(Fin du test de l'état de croissance du rameau)**,

5 - enfin si t<T le programme boucle sur l'étape 2 qui verra la formation du rameau suivant **(Fin du test de formation du rameau courant)**, sinon il s'arrête.

[1] [Reffye (de), Ph. et Snoeck, J., 1976], p. 23.
[2] Ce résumé simplifié s'inspire directement de l'organigramme symbolique qui est figuré dans l'article à la page 23.
[3] [Reffye (de), Ph. et Snoeck, J., 1976], p. 23.

À la fin, le nombre courant de rameaux est le nombre total de rameaux de l'arbre à l'âge T et le nombre courant de nœuds fructifères est le nombre total de ses nœuds fructifères.

Avec cet organigramme, on voit bien que le fonctionnement du premier modèle mathématique F(t) est échantillonné ou, si l'on veut, fractionné, de façon à laisser s'effectuer, à chacune des étapes déterminées par la fonction F(t), le fonctionnement du second modèle mathématique g (t). Sans la programmation sur ordinateur, il n'aurait pas été possible d'effectuer cette fragmentation et donc de conserver la complexité de chacun de ces modèles mathématiques telle quelle. Il aurait fallu trouver des modèles plus simples dont la composition aurait été calculable à la main ou bien encore un modèle mathématique global également calculable à la main comme ceux que proposaient habituellement les biométriciens de l'IFCC.

Le rôle de la technique : le HP 9820 et le langage HPL (*Hewlett-Packard Language*)[1]

Dans l'article de 1976, de Reffye et Snoeck insistent aussi sur le caractère décisif qu'il y a à disposer pour ce faire de ce qu'ils appellent un « calculateur programmable ». Au début de son travail à l'IFCC, de Reffye avait eu beaucoup de mal à faire tous les calculs qu'il souhaitait conduire. À son arrivée en Afrique, il ne disposait que de machines à calculer électromagnétiques ou mécaniques. Pour sa thèse de 1975, il n'avait encore qu'une machine à calculer électronique à mémoires Monroe[2] que son directeur de laboratoire, qui n'était autre que J. Snoeck, avait finalement réussi à lui obtenir. Dans la première version de son programme, de Reffye dessine lui-même à la main les arbres obtenus par le calcul ou bien encore, il les fait dessiner par un assistant de recherche ivoirien de l'IFCC qui se trouve être un très bon dessinateur : Valentin Yapo[3]. Un de ces dessins « manuels » déterminés par les résultats précis du programme sera d'ailleurs publié tel quel dans l'article de 1976 à côté de ceux obtenus plus tard par table traçante.

Mais, par la suite, de Reffye va bénéficier d'une aide décisive. Comme pendant cette période ivoirienne, il est parfois amené à fréquenter les physiciens de la Faculté d'Abidjan, il se trouve que deux d'entre eux, Marchand et Lapasset, vont s'intéresser à son travail. Ils vont le conseiller techniquement et l'informer de l'apparition toute récente de machines programmables de bureau. Pendant un certain temps, en 1975 et 1976, ces derniers vont lui laisser un libre accès au calculateur programmable de la Faculté de physique : le tout nouveau calculateur Hewlett-Packard HP 9820 A, sur le marché depuis 1972[4]. Un tel calculateur est dit programmable en ce qu'il permet

[1] Pour les données techniques de ce passage, nous nous sommes aidé de [Hicks, D., 1995-2002], notamment de la fiche technique de la HP 9820 disponible plus précisément à l'adresse www.hpmuseum.org/hp9820.htm.

[2] La « Monroe Calculator Company » a été fondée en 1912 aux Etats-Unis. Cette firme a commercialisé parmi les premières machines électriques à additionner. Ces dernières étaient d'ailleurs souvent construites en Italie pour le compte de Monroe. Les machines électroniques Monroe ont ensuite été parmi les premiers calculateurs électroniques de bureau à transistors et à circuits intégrés. Elles ont été construites à partir de 1968, essentiellement au Japon, sur le modèle de machines Canon. La politique de la compagnie Monroe a consisté à ne pas concevoir de machines programmables mais à proposer des mémoires (avec des registres fonctionnant par délai acoustique, fabriqués par NEC) et des fonctions scientifiques assez complexes en accès direct sur le clavier, notamment dans les versions dites « 1920 » du milieu des années 1970. La logique de conception et d'utilisation y restait donc fondamentalement arithmétique et non algébrique. Ces machines coûtaient alors entre 700 et 1300 dollars de l'époque. Pour ces informations, nous nous sommes appuyé sur des documents diffusés sur Internet : [Bensene, R., 2002] et [Monroe Computer Museum of America, 2002].

[3] Dans la partie « Remerciements » de sa thèse d'Etat de 1979, de Reffye remerciera nommément et personnellement tous les assistants de recherche qui l'ont aidé, dont Valentin Yapo. Dans leur grande majorité, ces techniciens sont des autochtones en poste à l'IFCC.

[4] Pour une présentation technique, voir notre annexe D.

d'intégrer des fonctions logiques avec des fonctions mathématiques classiques dans une production formelle unique : un programme. Ce programme devient le lieu d'un entrelacement étroit, et pas à pas, entre le formalisme logique, le formalisme algébrique et le formalisme analytique. L'organigramme proposé, malgré sa mixité, peut ainsi aisément y être implémenté.

Il faut noter que le prix de la version de base de cette machine égale celui des machines Monroe les plus évoluées de la même époque : environ 1300 dollars. L'IFCC prévoit donc d'en acheter une, mais pas dans l'immédiat, et de Reffye travaille d'abord uniquement sur la machine qui lui est prêtée. C'est donc grâce à la mise à disposition d'un tel appareil qu'il peut, en autodidacte, s'initier à la programmation et au langage de programmation d'Hewlett-Packard dérivé du FORTRAN qu'est le HPL (*Hewlett-Packard Language*) et qu'il peut publier, avec J. Snoeck, l'article du premier trimestre de 1976.

« Matérialiser » la représentation pour caractériser la verse du caféier

Au début de l'année 1976, le modèle de croissance continue semble remplir la fonction qu'en attendaient les agronomes. Jusqu'en 1980 au moins, il sera notamment utilisé pour évaluer l'impact des engrais sur la croissance, comme en témoignera un travail plus tardif de J. Snoeck que nous évoquerons bientôt. Mais, dans cette même problématique de perfectionnement de la représentation des plantes en vue de l'amélioration de leur rendement par sélection génétique, la préoccupation de de Reffye devient quelque peu différente en cette année 1976. Un phénomène limitant majeur est en effet apparu dans le développement des hybrides « Arabusta » de l'équipe de J. Capot : la verse[1]. Dans le cas de l'hybride nouvellement conçu, ce phénomène, déjà connu pour d'autres variétés, devient à ce point fréquent et donc limitant pour le rendement (puisque les fruits en souffrent directement) que la pratique qui s'est mise en place à l'IFCC pour y remédier consiste à recourir systématiquement à des tuteurs en très grand nombre. Or, ce qui peut se faire dans une station d'essai n'est pas économiquement envisageable pour une production intensive normalisée : les coûts en temps et en main d'œuvre y seraient prohibitifs. Ne pas recourir au tuteurage dans ces conditions serait néanmoins dramatique car, le caféier étant une plante arbustive productive pendant plusieurs années et non un végétal dont l'exploitation totale se fait sur une seule année, le dommage causé par la verse « concerne non seulement l'année en cours, mais aussi les années suivantes »[2].

Il faut donc tâcher de sélectionner les clones d'Arabusta qui seraient les plus résistants à la casse ou à la verse. Or, pour ce faire, s'ils peuvent s'appuyer sur ce qu'ils constatent *de visu* du comportement moyen sur le terrain de certains clones d'Arabusta, les agronomes manquent de marqueurs précis et discriminants pour une telle sélection. De Reffye pense alors qu'il peut modifier son programme de modélisation de croissance dans le but de donner à voir plus précisément quels sont les facteurs clés qui interviennent dans ce phénomène de verse. Car il faut que ces facteurs décelés analytiquement (mais par le recours à une représentation synthétique complexifiée) soient en même temps précisément et aisément mesurables par le sélectionneur. Là encore, il ne s'agit *pas d'expliquer théoriquement* les phénomènes mais de trouver une échelle pertinente de mesure à laquelle se trouvent certains caractères de l'arbre (encore à déterminer) ayant pour propriété de donner lieu une fois insérés dans un modèle logico-mathématique non seulement à une prédiction conforme aux résultats finaux mais aussi à une prise objective plus

[1] C'est la tendance qu'ont les caféiers ou d'autres arbres à voir leur tige ou leurs rameaux plier sous la charge des fruits qu'ils portent.
[2] [Reffye (de), Ph., 1976], p. 251.

précoce sur les phénomènes aux yeux du sélectionneur. Cette prise est « objective » si elle part d'observables précis et discriminants donnant eux-mêmes lieu à une interaction opérationnelle sur l'objet d'étude ultime propre à la problématique scientifique considérée ici, à savoir le caféier et son génotype. Par cette nouvelle modélisation, de Reffye pense en fait qu'il va pouvoir « caractériser » au sens fort du terme la verse du caféier. En effet, dans le travail du deuxième article de 1974, il avait décelé ce qu'il avait appelé deux « caractères » génétiques transmissibles et inaperçus jusqu'alors : les probabilités P1 (probabilité de formation des cerises) et P2 (probabilité de formation des grains). De même, en procédant à une modélisation des comportements mécaniques des tiges et des rameaux en croissance, il pense pouvoir exhiber le ou les « caractères » conditionnés par la génétique et qui déterminent eux-mêmes le risque de verse. Ce seraient alors ces caractères mesurables qui commanderaient une sélection précise et rigoureuse et non plus empirique, c'est-à-dire à vue, sur les seules performances globales de terrain.

L'insertion d'un savoir d'ingénieur : la résistance des matériaux

De Reffye distingue deux types de phénomènes mécaniques pouvant affecter la tige et les rameaux du caféier : le flambage pour la tige orthotrope, la flexion pour les rameaux plagiotropes. Ce type de problèmes appelle un genre de techniques mathématiques développées d'ordinaire, depuis le milieu du 19ème siècle, dans la « théorie de la résistance des matériaux » selon les termes mêmes de de Reffye[1]. En fait, il s'agit, peut-on dire, d'une science appliquée ou d'une science pour l'ingénieur qui semble devoir se distinguer d'une science jugée plus fondamentale. Elle est en tout cas plus ou moins reconnue comme telle dès ses débuts dans la mesure où ses promoteurs reconnaissent qu'à la différence des autres formalismes mathématiques portant sur des phénomènes physiques, « toutes ces théories reposent sur des hypothèses qui ne traduisent qu'imparfaitement les faits »[2]. On pourrait objecter qu'il est en est sans doute de même des théories fondamentales, comme la théorie de l'électromagnétisme de Maxwell, par exemple. En fait, ce qui distingue la discipline dite « résistance des matériaux » des sciences physiques jugées plus fondamentales tient tout d'abord à ses objectifs volontiers pragmatiques, ensuite à la nature de ses objets qui sont essentiellement des artefacts humains et enfin à la conséquence majeure de ces deux particularités précédentes : son caractère déjà éminemment composite.

Pour sa part, de Reffye en accentue le caractère théorique pour son usage propre. Il se prépare ainsi à adapter des formules mathématiques valables pour des solides homogènes, intervenant habituellement dans des structures construites par l'homme, au problème de la verse du caféier. Le transfert de méthode de cette science des artefacts à la mécanique de l'arbre ne lui pose pas de problème. Il ne précise pas les hypothèses. Sans poser la question de son existence

[1] [Reffye (de), Ph., 1976], p. 252.

[2] [Lemaître, J., 1990, 1995], Introduction, p. 904. La discipline qui correspond à la « résistance des matériaux » regroupe de façon composite un ensemble de théorisations des différents types de comportements des matériaux : mécanique générale, mécanique des solides, mécanique des milieux continus (dont la rhéologie). Signalons qu'à la même époque (1975), le CNRS se dote d'un département des Sciences Pour l'Ingénieur (SPI) dont [Ramunni, G., 1995] raconte la naissance controversée puis l'évolution postérieure. Toujours est-il que dès 1975, la section IV de ce nouveau département est pleinement et explicitement dédiée à la « mécanique et à l'énergétique ». Plus précisément, la sous-section dite « mécanique » rassemble les disciplines suivantes : « mécanique des fluides, mécanique des solides, rhéologie et mécanique des sols, mécanique des vibrations et acoustique, mécanique générale » [Ramunni, G., 1995], p. 68, n. 24. À cette date, la « résistance des matériaux » est donc bien considérée comme une « science pour l'ingénieur ».

et de la pertinence de sa définition dans ce cas de figure, il se contente d'indiquer qu'il se propose « de calculer le module de Young de la partie lignifiée » du rameau[1].

Rappels de « résistance des matériaux »

Une application directe à l'arbre vivant ou un transfert de méthode ?

Dans le deuxième article de 1976 qui intègre la mécanique du caféier, de Reffye redéfinit d'abord le module de Young E qui intervient dans la formule phénoménologique de la résistance des matériaux exprimant l'allongement $h\text{-}h_0$ par traction d'une barre de section S soumise à une force F :

$$h\text{-}ho = \frac{1}{E} \times \frac{h_0}{S} \times F$$ [2]

À partir de cette définition du module de Young, il lui est possible de définir le *moment fléchissant* M en un point de la barre lorsqu'elle est soumise à un effort de flexion :

$$M = \frac{E \times I}{r}$$

où r est le rayon de courbure engendré par l'effort de flexion et I le *moment d'inertie* de la section[3]. Comme les tiges et les rameaux sont à section à peu près circulaire, on a :

$$I = \frac{\pi \times R^4}{4}$$

où R est le rayon de la section de la tige.

Dès lors, disposant de la définition du module de Young et de celle du moment fléchissant, il lui est possible de formuler l'équation de la flèche d'une barre soumise à une force de flexion en son extrémité libre. Si de plus on considère qu'un rameau de caféier est un tronc de cône de longueur h_0, dont le plus grand diamètre est D_0 (diamètre de la base du cône) et dont le plus petit diamètre est d (celui de l'extrémité libre), la flèche due à l'effort de flexion s'exprime comme suit :

$$Y_0 = \frac{4F h_0^3}{3E\pi R_0^4 (1 - B h_0)}$$

[1] [Reffye (de), Ph., 1976], p. 255.
[2] [Reffye (de), Ph., 1976], p. 254.
[3] De Reffye rappelle qu'« on peut le démontrer » mais il ne le redémontre pas lui-même. Il s'appuie sur des cours de résistance des matériaux qu'il cite en bibliographie : ceux de Bruhat, de Courbon et de Montaguer [Reffye (de), Ph., 1976], p. 272.

Cette formule permet également d'écrire le module de Young en fonction de la flèche mesurée. C'est de cette dernière expression que de Reffye va se servir directement pour son programme :

$$E = \frac{6{,}79 \times F \times h_0^{\ 3}}{Y_0 \times d \times D_0^{\ 3}}$$

En appliquant des poids F connus aux extrémités de plusieurs branches et de tiges de clones de type Robusta 182 et en mesurant la flèche obtenue Y_0 ainsi que les dimensions correspondantes (h_0, D_0 et d), de Reffye procède alors à différentes mesures du module de Young[1]. Il le trouve relativement stable pour un même clone, que ce soit sur ses rameaux ou sur sa tige. Il en tire la conclusion qu'il peut être considéré comme une « constante génétique caractéristique »[2]. Son premier but est donc atteint : trouver un caractère du comportement mécanique de l'arbre aisément mesurable[3]. De plus, en faisant des mesures variées, il se confirme que ce caractère discrimine très bien les différentes espèces et variétés de caféiers selon leur résistance à la verse. Pour les Arabusta notamment, on mesure un module de Young faible, ce qui est signe d'une faible résistance à la verse comme on le constate visuellement en champ.

Par la suite, de Reffye veut marier la représentation de la verse des caféiers sur table traçante avec la représentation de la géométrie et de la croissance de l'arbre dont il dispose déjà. Il cherche à produire un programme qui associerait le comportement mécanique de l'arbre à sa croissance géométrique. Il lui faut donc d'abord exprimer la force critique (FC) nécessaire au flambage d'une tige de caféier : une tige verticale de longueur h flambe lorsqu'elle passe d'un équilibre stable à un équilibre instable par rapport à l'effort qu'exerce un poids sur son extrémité libre. On peut l'exprimer directement en faisant apparaître le nombre de nœuds n et la taille de l'entre-nœud moyen dh de la tige à la place de la hauteur de la tige :

$$FC = \frac{0{,}12 \times E \times D^4}{n^2 (dh)^2} \quad \text{où } D = 2.r \text{ (diamètre de la tige)}$$

Le programme de croissance sera donc capable de déterminer quand il y aura flambage puisqu'il est déjà capable de déterminer le nombre d'entre-nœuds ainsi que la totalité des éléments biologiques dont le poids s'exerce sur l'extrémité de la tige :

« En effet, la charge de fruits par nœud étant connue, ainsi que le poids moyen d'un entre-nœud et d'une feuille, l'arbre étant symétrique, la résultante des poids s'applique sur la tige, en un point calculable. Si en ce point la charge dépasse la force critique, la tige pliera selon les lois de la théorie de la résistance des matériaux ; l'axe orthotrope sera alors en flambage.

[1] Voir l'encadré pour la détermination de la formule utilisée.
[2] [Reffye (de), Ph., 1976], p. 256.
[3] « En pratique, trois mesures par arbre suffisent pour avoir une bonne approximation du module », [Reffye (de), Ph., 1976], p. 256.

De même, chaque branche étant connue géométriquement, ainsi que mécaniquement, pour la répartition des charges sur sa longueur, on pourra la faire fléchir selon les mêmes lois. »[1]

Dans le cas des rameaux, il est en effet également possible d'exprimer pas à pas, c'est-à-dire ici entre-nœud par entre-nœud, la flexion forte qu'ils subissent et donc la forme globale du rameau, cela grâce à des formulations approchées des équations fondamentales. Le calculateur programmable et la table traçante de la faculté d'Abidjan ont, là encore, servi de supports au travail de de Reffye. L'article publie alors des profils de caféiers plus ou moins affectés par la verse en fonction des modules de Young qu'on leur affecte au début du programme.

Un programme plus complexe et une programmation plus structurée

Ce programme est nettement plus complexe que celui du simple modèle de croissance car le nombre de branchements devient considérable. La liste en HPL est cependant encore publiée à la fin de l'article mais l'organigramme n'y figure pas. Seules figurent les attributions des registres aux variables du problème mathématique. Ce programme comporte en tout 63 lignes en HPL et il utilise une cinquantaine de registres sur les 172 disponibles dans la mémoire de la HP 9820 A. Par ailleurs, le style de programmation s'est quelque peu complexifié puisque de Reffye n'avait recours, dans son premier programme, qu'à des branchements directs de lignes (par l'instruction « GTO » = GO TO n°de ligne) alors que désormais il recourt le plus souvent à des appels de sous-routines (par l'instruction « GSB » = GO SUB « label »). Ces morceaux de programmes (ou routines) caractérisés et baptisés par des labels se terminent par l'instruction RET (= RETURN) qui commande un retour à l'endroit du programme qui succède à celui auquel la routine avait été appelée. Le branchement GOTO en revanche est un simple saut définitif. Pour sa part, il n'appelle pas un morceau du programme en tant que morceau fonctionnel autonome, c'est-à-dire qui serait situé à un sous-niveau hiérarchique et dont la machine pourrait s'extraire ensuite pour reprendre le fil principal et hiérarchiquement plus élevé du programme, contrairement à GOSUB. Lorsqu'on a recours à GOTO, on est donc obligé de maîtriser complètement ce qui se produit dans la suite rigoureuse et linéaire des lignes d'instructions et de faire que cette suite soit bien ce qui logiquement doit se produire. Lorsque des *types de tâches* sont répétés (et non seulement des tâches précises comme dans les simples boucles), cela dévore très vite de la mémoire puisque l'on doit reproduire à chaque fois le morceau de code qui leur correspond. Cela implique qu'il devienne très redondant. En revanche, parce qu'elles peuvent être appelées de différents endroits et surtout parce qu'elles peuvent *renvoyer à ces mêmes différents endroits* une fois leur sous-traitement effectué, les sous-routines permettent une programmation mieux hiérarchisée et moins redondante, donc plus économique en mémoire et plus souple.

En ce qui le concerne, le nouveau programme de de Reffye, dit « Simulation de la verse du caféier », reprend l'ancien programme de croissance, dit « Traçage de l'architecture », avec les mêmes attributions de registres pour les variables intervenant dans la croissance. Mais il est intéressant de remarquer que ce qui constituait le cœur du premier programme est instrumenté par le second sous la forme de routines : ce sont justement les équations de croissance de la tige et les équations de croissance des rameaux qui ont été reléguées dans deux sous-routines séparées. Donc la boucle principale est celle de la détermination et du traçage sur le *plotter* HP 9862 de la forme de la courbure à chaque pas. Les processus de croissance sont appelés l'un

[1] [Reffye (de), Ph., 1976], pp. 259-260.

après l'autre, mais chaque fois seulement après que la représentation des éléments architecturaux apparus dans l'étape précédente ait été calculée, avec l'éventuelle verse qu'ils occasionnent. Le calcul de la verse est donc lui aussi traité pas à pas après chaque pousse et avant chaque autre pousse : l'intrication mutuelle des sous-modèles est totale, comme on le voit.

Comment publier un programme informatique ?

À la lecture de ce programme, quelque chose de frappant peut être immédiatement constaté : son caractère inintelligible dans le détail de sa séquence. Comme on ne dispose pas d'un organigramme, il faut en effet procéder à une lecture attentive, avec un papier et un crayon, si l'on veut suivre la séquence des tâches qu'il accomplit en vue d'en comprendre ensuite la structure générale. Cette compréhension est rendue d'autant plus difficile que de Reffye renonce à nous donner l'attribution de la cinquantaine de registres qui y figurent et dont les noms sont très sibyllins puisqu'il ne peuvent être appelés que par leur formule générique R(i). Seule une vingtaine de noms de registres sur la cinquantaine utilisés se voient clairement attribuer leurs correspondants mathématiques et biologiques dans un tableau récapitulatif. Cette explicitation limitée constitue, on le comprend, un véritable défi à la mémoire du lecteur et donc à la vérification précise du programme. Dès lors, pourquoi publier la liste d'un programme ?

Citer la liste non totalement commentée d'un programme dans ces conditions ne relève plus vraiment d'une entreprise de communication et de clarification des preuves, comme cela semble devoir être la règle pour un article scientifique, mais sans doute plutôt d'une volonté de produire un certain effet de réalité par rapport à la production technique laborieuse que constitue indéniablement la conception d'un programme informatique[1]. Il y a là un mouvement d'intégration et de concrétisation de l'instrument linguistique de contrôle de la machine programmable (le programme) qui devient ainsi l'analogue d'un objet technique « concret », au sens de Simondon[2].

[1] Dans le cas de figure qui nous occupe, même si on peut l'interpréter en ce sens, nous n'irons pas jusqu'à dire qu'il s'agit d'un argument d'autorité masqué parce que chosifié et fondé sur un « recrutement » des symboles, des procédés intellectuels et des techniques informatiques. Un tel « recrutement », compris au sens de [Latour, B., 1989, 1995], fonctionnerait sans doute comme une politique de l'exhibition du programme informatique présenté comme fait accompli, c'est-à-dire encore comme une chose bien réelle car compacte (dotée de propriétés enchevêtrées et inextricables) et non plus comme un simple argument. La chose réalisée, c'est-à-dire littéralement rendue réelle de ce fait, aurait pour immense avantage de ne pas prêter à contestation, à contre-argument ou contre-exemple. Nous ne pensons pas devoir employer une telle grille de lecture sociologique dans la mesure où le caractère sibyllin du programme n'est pas, à l'heure où il a été conçu, ce qui est prioritairement voulu en tant que tel. Il est avant tout le simple fruit de limitations techniques, notamment dues à la faible mémoire de la machine utilisée. D'autre part, à ce moment-là, de Reffye ne recherchait pas particulièrement à imposer sa compétence à travers sa maîtrise de la programmation (puisqu'il ne lui semblait pas encore y avoir beaucoup de répondant et donc d'attentes de ce côté là, à l'IFCC) mais plutôt à travers les résultats biologiques et agronomiques obtenus. De plus, dès 1976, comme on le voit dans ses premiers programmes, s'il recherche une telle reconnaissance, c'est bien plutôt à travers la visualisation réaliste des résultats de la simulation. En effet, comme on le verra bientôt, c'est cela qui lui semblera un bon moyen d'imposer son approche auprès de ses pairs et de faire consensus autour de lui, donc de « recruter » si l'on veut. Il ne faudrait donc pas faire ici une lecture anachronique qui présenterait d'emblée celui qui le premier a employé l'ordinateur dans un domaine scientifique historiquement éloigné de ses lieux de naissance, comme ayant été l'occasion et l'objet d'enjeux de pouvoir immédiatement considérables, même si certains signaux précoces en ce sens peuvent, de notre point de vue postérieur mais autrement informé, donc déformant, y être décelés.

[2] Voir [Simondon, G., 1958, 1969, 1989], pp. 20-23. Cependant, ce qui reste conceptuellement très pertinent dans l'analyse de Simondon pour le cas du programme implémentant ce que nous appelons une modélisation fractionnée (car il y a bien une sorte de « convergence des fonctions dans une unité structurale », *ibid.*, p. 22) ne l'est plus lorsqu'il s'agit du produit des programmes de simulation, c'est-à-dire des simulations informatiques proprement dites. Comme nous le verrons, dans le cas des simulations réalistes de plantes, c'est plutôt la relation inverse qui est vraie : il y a une diversification des fonctions susceptibles d'être remplies par la simulation, cela par l'effet d'une intégration et d'une concrétion, ou co-croissance, des diverses caractéristiques structurelles. En ce sens, les simulations informatiques, dès lors qu'elles passeront pour des doubles d'une réalité complexe et qu'elles serviront à une extension du domaine de

D'une part, en effet, le fait que l'on se trouve ici en face d'une liste d'instructions symboliques, que l'on peut encore citer intégralement, montre qu'il s'agit clairement d'une production intellectuelle, proche en cela d'un argument scientifique présenté en langage naturel ou sous la forme d'un symbolisme mathématique (équations ou formules). La nature du programme peut dès lors sembler homogène à celle des signes ou des symboles habituels. Mais d'autre part, la longueur et la rapide opacité structurelle d'une telle liste font qu'on ne peut considérer avoir affaire à une simple écriture symbolique d'un nouveau genre. Le décryptage visuel qu'elle exige est d'une tout autre nature que celui que demande une simple lecture ou une classique interprétation des symbolismes mathématiques. Une lecture-interprétation des symboles mathématiques procède en effet principalement par évocation successive puis simultanée, en imagination, des opérations que chaque symbole tout à la fois désigne, abrège et remplace. Au besoin, une telle lecture se complète et s'assure de sa compréhension d'une part au moyen d'une reprise active, c'est-à-dire écrite, du cheminement qui donne naissance et sens aux symboles formulés : on lit un livre de mathématiques ou de physique théorique un crayon à la main. D'autre part, le lecteur peut s'expliciter la formule symbolique nouvelle, car résultant d'un travail de recherche inédit, en la rendant opératoire sur des valeurs particulières (des exemples donc) pour s'assurer de sa capacité à « prendre » en une seule vue de l'esprit (ce que signifie « comprendre ») l'opération globale qu'elle institue à partir des opérations déjà instituées et intériorisées par le lecteur qu'il est et la communauté qui est la sienne.

Or, peut-il en être de même avec la liste d'un programme informatique ? Si l'on peut en droit suivre une liste de programme en écrivant à la main ses étapes successives pour suivre pas à pas l'automate des états logiques que la machine suit, en fait, dès que le programme devient complexe et notamment, comme c'est le cas ici, dès qu'il recourt à des sous-routines emboîtées qu'il appelle un très grand nombre de fois (plusieurs centaines ou plusieurs milliers ou millions de fois), il n'est pas possible au lecteur de se livrer à ce suivi pas à pas. S'il n'en est pas le concepteur, son travail de compréhension du programme ne peut être en fait que directement symétrique et opposé à celui qui est d'ordinaire le sien face à des symboles mathématiques : un travail de synthèse et d'abréviation à l'égard des opérations pas à pas du programme et non un travail d'analyse, comme c'était le cas pour le symbolique. Alors que l'opératoire est enveloppé dans le symbole et dans la formule mathématique, et qu'il demande à être pour cela déplié et explicité[1], l'opératoire est en revanche la substance même, certes immédiatement accessible et lisible, de la liste d'un programme, mais rapidement incompréhensible. Pour s'expliquer un programme, on ne va pas vers l'opératoire élémentaire, bien plutôt, on en part. Il n'y a là nul symbole qui envelopperait une tâche complexe et précise à se figurer, mais il y a au contraire à tenter de synthétiser ces tâches morcelées et en lambeaux, en quelque sorte, pour les constituer à

---

l'expérimentation, n'apparaîtront plus véritablement comme des objets techniques finalisés, pas plus qu'elles ne vaudront comme de simples calculs singuliers, ou instanciations, d'un modèle mathématique préalable.

[1] Nous avons conscience de la simplification que nous faisons subir ici aux notions de lecture et de compréhension mathématiques. Comme le montre J.-T. Desanti [Desanti, J.-T., 1975], pp. 172-174, la « production d'un concept » mathématique et sa compréhension renvoient toujours à un travail de production (au sens d'une « explicitation », d'une « mise au jour ») et d'insertion de ce concept dans un contexte interprétatif déjà constitué comme tel, par ailleurs, parce que rendu opératoire. En cela, nous le suivons. Mais nous n'insistons pas ici sur le fait indéniable que ce contexte est lui-même à contextualiser pour prêter à compréhension (ce qui fait qu'il n'y a pas de compréhension pleine et définitive en mathématique), et cela sans doute sans fin. Nous nous contentons de nous appuyer ici sur le possible (et toujours réel) arrêt temporaire de ce processus d'emboîtement des contextualisations et des structures mathématiques dans une pratique interprétative particulière à la communauté mathématicienne de l'époque. C'est cela qui nous permet de définir ici, de façon certes limitée et historiquement contextualisée, la compréhension que l'expert a de tout symbole mathématique. Sur le symbole mathématique et sa toujours possible analyse en des termes opératoires plus élémentaires, voir également les réflexions de E. Ortigues inspirées de Bourbaki et Wittgenstein [Ortigues, E., 1962, 1977], pp. 171-176.

une échelle logique intégrée où elles peuvent nous donner du sens. Ce travail inverse est extrêmement difficile voire impossible en fait, sinon en droit, surtout quand aucune indication mnémotechnique sur la structure du programme n'est donnée dans la liste. Il est bien plus difficile que celui de l'explicitation de formules symboliques puisqu'il se fonde sur un travail d'imagination doublé d'un travail empirique d'essai (et erreur) de synthèse, non orienté *a priori*, donc souvent fondé sur l'heuristique du pari. Ce travail est inductif plus que déductif. Il demande des capacités d'observation et de rapprochement bien loin d'une analyse linéaire. Il est donc un défi pour l'imagination autant que pour le pouvoir de synthèse de l'imagination.

C'est une des raisons épistémologiques pour lesquelles de Reffye et d'autres chercheurs, à la même époque[1], tout en continuant dans un premier temps à publier la liste de leurs programmes, commencent à ne plus voir l'intérêt qu'il y a à lui donner la fonction d'une explicitation et d'une justification du travail accompli, ce qui devrait continuer d'être la fonction principale d'un article scientifique. À tel point qu'au début des années 1980, pour les articles plus tardifs qui présenteront les travaux de sa thèse d'Etat, de Reffye décidera de ne plus faire paraître que les organigrammes logiques de ses programmes. Dans ses productions, la publication des listes des programmes sera donc progressivement remplacée par la publication des seuls organigrammes, plus courts, plus lisibles et plus universels. En effet, en visualisant les séquences logiques sous forme d'un graphe, la fonction des routines comme les branchements conditionnels, l'organigramme présente également le grand avantage de ne pas opposer au lecteur ou à l'utilisateur la barrière de la spécificité du langage de programmation utilisé. Mais faire ce choix impliquera d'accepter une certaine déperdition dans la transmission de l'information. Or, comme nous le verrons plus loin, mais comme nous pouvons d'ores et déjà le supposer, ce choix ne sera pas sans quelques conséquences. Tout au moins, cette supposition, encore à confirmer, peut-elle déjà nous expliquer en partie pourquoi de Reffye et la plupart des utilisateurs pionniers de programmes codés en langage évolué ont d'abord fait le choix de publier leurs codes *in extenso*. Ils l'ont fait jusqu'au moment où le gain en explicitation pouvait être jugé nul au regard de la difficulté de la relecture.

Résultat : des préconisations précises pour le sélectionneur

Finalement, quelles sont les retombées opérationnelles pour ce programme intégré que propose de Reffye ? À la fin de la présentation de son travail de simulation, il insiste essentiellement sur les préconisations que l'on peut en tirer pour le sélectionneur agronome. Même si, avec son nouveau programme, il complexifie et rend plus réalistes les représentations du

[1] Par exemple, dans les actes du colloque *State-of-the-Art in Ecological Modelling* de 1978, présidé et édité par l'écologue modélisateur danois Sven Erik Jorgensen, on trouve encore quelques listes intégrales de programme. Ce sont essentiellement des listes de programme de simulation (avec modèle logico-mathématique donc) et non de modélisation mathématique de type Lotka-Volterra (donc avec des modèles mono-formalisés de type équations différentielles) car la nouveauté mathématique et informatique est alors du côté des approches par simulation. Il faut donc communiquer sur ce point. C'est le cas du travail de J. A. Meyer (écologue français qui travaillera ensuite en vie artificielle), et N. Pampagnin, membre du CEREQ (Centre d'Etude et de Recherche sur les Qualifications créé à Paris en 1973). Dans le cadre de l'ATP-CNRS (Action Thématique Programmée du CNRS) « Analyse des Systèmes » (contrat 3702), ils ont utilisé des ordinateurs du centre de calcul CIRCE du CNRS fonctionnant avec le langage SIMSCRIPT II pour simuler un système complexe de prédateurs-proies. La liste de leur programme fait déjà huit pages en tout : voir [Jorgensen, S. E., 1979], pp. 819-826. Le CIRCE était le Centre Interdisciplinaire Régional de Calcul Electronique d'Orsay. Il avait été créé à partir de l'Institut Blaise Pascal en 1970. Il a lui-même été supprimé et remplacé en novembre 1993 par l'IDRIS (Institut du Développement et des Ressources en Informatique Scientifique).

caféier en fractionnant davantage encore la modélisation logico-mathématique qui la sous-tend[1], son recours à la simulation de la verse et à sa visualisation sur table traçante[2] passe avant tout pour une confirmation de la validité des équations théoriques elles-mêmes adaptées des formulations classiques de la résistance des matériaux.

La simulation et la visualisation ne sont donc pas d'abord présentées comme des fins en soi. Elles doivent plutôt jouer le rôle argumentatif d'une confirmation empirique seconde en tant qu'elles donnent la possibilité d'une comparaison directe des résultats « théoriques » avec les observables en champ : par une sorte de transitivité de la confirmation, l'expérimentation confirme la simulation qui elle-même confirme le sous-modèle théorique pour le phénomène de verse. Cette comparaison du champ et de la simulation peut se faire à l'œil nu mais aussi plus rigoureusement avec des outils statistiques adaptés. En effet, grâce à la technique de la modélisation mathématique fractionnée et recombinée, la visualisation de la verse est fondée ici sur une formalisation théorique qui se présente clairement comme surajoutée et comme imbriquée dans la formalisation antérieure de la croissance architecturale et géométrique déjà validée pour elle-même. Il est donc possible de considérer comme relativement validé ce nouveau morceau de théorie dès lors que la simulation globale donne une représentation toujours plus fidèle de la réalité, surtout du point de vue du nouveau phénomène particulier qui nous intéresse : la verse. S'appuyant sur ces considérations épistémologiques, assez peu explicites dans l'article parce qu'elles lui paraissent évidentes[3], l'auteur se concentre sur ce qui lui semble validé afin d'en tirer

---

[1] On a en effet affaire à quatre modules principaux qui correspondent chacun à un sous-modèle propre à un phénomène biologique particulier : la croissance de la tige, la croissance des rameaux, la verse de la tige et la flexion des rameaux. Ces quatre sous-modèles mathématiques sont enchevêtrés dans leurs usages : ils s'instrumentalisent les uns les autres successivement et mutuellement en fonction de conditions logiques déterminées par les résultats quantitatifs des sous-modèles eux-mêmes (conditions de branchement logique axées sur les dépassements des temps critiques ou des poids critiques des rameaux, etc.). La *structure* de l'automate, ou séquence des états logiques, d'un tel programme (pourtant très simple) dépend donc du *fonctionnement* de l'automate lui-même. On ne saurait donc se dispenser de son fonctionnement pas à pas pour en connaître la structure et la dynamique.

[2] Rappelons que la machine HP 9820 ne disposait pour tout écran que d'une ligne de 16 diodes électroluminescentes dont la conception électronique ne permettait que l'affichage de combinaisons alphanumériques et non de dessins proprement dits. La conception électronique des LEDs faisait qu'elles ne disposaient chacune que de 35 « points lumineux » (matrice de 7 lignes sur 5 colonnes) qui pouvaient être alternativement rendus luminescents ou non en fonction de la structure logique du signal arrivant à leurs bornes. C'est cela qui leur permettait d'afficher uniquement des caractères alphanumériques. La machine devait donc recourir à un périphérique appelé « *plotter* », le HP 9862 A, littéralement un « traceur de points » et non une « imprimante », qui, de façon électromécanique, faisait circuler un stylo sur une surface plane sur laquelle on disposait (en fait on la fixait fortement pour ne pas que le passage du stylo l'arrache !) une seule feuille blanche. La machine reconnaissait cette surface d'écriture comme une matrice logique de points équivalents et indépendants les uns des autres. Le stylo circulait au-dessus de cette matrice au moyen d'une barre coulissante elle-même doublée d'un chariot coulissant susceptible d'abaisser le stylo sur la feuille, ou de le relever, quand il le fallait. Pour changer de couleur, il fallait changer le stylo par une intervention manuelle.

[3] Dans quelle mesure peut-on admettre que l'on a validé un sous-modèle théorique intervenant dans une simulation globale à côté d'autres sous-modèles déjà validés, quand cette simulation globale elle-même semble validée ? À cause de l'enchevêtrement fondamental et explicite des sous-modèles, on ne peut pas décemment se reposer sur une hypothèse d'additivité des modèles permettant d'affirmer que les validations s'ajouteraient donc pourraient également se soustraire : SM1 (sous-modèle 1 validé) + SM2 (sous-modèle 2 à valider) = SIM (simulation globale validée) « donc » SM2 = SIM validée - SM1validé est « validé » ? On voit bien que l'enchevêtrement des SM est précisément ce qui empêche ce type de raisonnement. On pressent même qu'il faudrait une sorte d'« orthogonalité » (apparentée à celle qui peut intervenir entre des espaces vectoriels) entre les sous-modèles impliqués (ou leurs formalismes) pour que des opérations de validations indirectes de ce genre puissent être effectuées légitimement et en toute rigueur. Dans le milieu de la modélisation en sciences du vivant, ce type de préoccupation est devenu explicitement crucial seulement à partir du milieu des années 1990, essentiellement à partir de la modélisation orientée-objet : voir [Coquillard, P. et Hill, D. R. C. Hill, 1997], pp. 183-200. De son côté, en 1976, de Reffye ne se pose pas vraiment le problème dans toute sa rigueur, précisément parce qu'il considère en fait que la première partie de son article a *déjà* validé de façon autonome le sous-modèle de résistance à la verse. Il se pose un problème suffisamment simple pour que SM1 et SM2 puissent paraître tous les deux validés séparément *avant* la simulation globale. SM2 avait été en effet calibré et diversement testé, donc validé, par des expérimentations mécaniques indépendantes et directes sur les rameaux et sur la tige. De plus, il nous présente SM2 davantage comme une *application* des méthodes de la physique des matériaux que comme un simple *transfert* de modèle, ce qui aurait eu sinon pour effet de lui donner une moindre légitimité théorique.

les bénéfices pour l'entreprise de sélection de l'IFCC : la reconstitution, à l'aide des sous-modèles de résistance des matériaux (notamment avec les formules de la « force critique », force à partir de laquelle la tige du caféier flambe), d'un scénario mathématique de combinaison des caractères génétiques intervenant dans la casse, sert à désigner les marqueurs génétiques qu'il faut en dernier ressort sélectionner. Ainsi écrit-il :

« Le modèle mathématique mis au point permet de définir avec précision le rôle de chaque paramètre de l'architecture du caféier dans la résistance à la verse. Les progrès réalisés par la sélection sur chaque paramètre peuvent faire l'objet d'une simulation, pour voir directement l'amélioration de la stabilité qui en découle. »[1]

Le genre de sélection qu'évoque de Reffye s'effectue par bouturages des souches qui s'avèrent les meilleurs en champ du point de vue du caractère que l'on choisit. Comme la méthode logico-mathématique qu'il préconise donne aussi à l'expérimentateur les moyens de mesurer précisément et sans ambiguïté les caractères principaux intervenant dans les équations du sous-modèle mécanique (module de Young, longueur de l'entre-nœud, diamètre des tiges), elle donne finalement la possibilité au sélectionneur de disposer de critères précis pour ses propres décisions. Il pourra ainsi tout à la fois mesurer des critères et prédire le comportement en stabilité des souches qu'il aura sélectionnées. La modélisation logico-mathématique est peut-être une formalisation mixte, impure pourrait-on dire. Il n'en demeure pas moins que son avantage décisif est donc de désigner et d'intégrer de l'expérimentable, du mesurable, dans des computations prédictives.

La réception des deux premiers modèles de de Reffye à l'IFCC

De façon révélatrice, dans une bibliographique analytique présentée par mots-clés (« biologie », « méthode culturale » « chimie », « aléas », « amélioration » et « technologie »), le fascicule n°2 de 1977 de la revue *Café, Cacao, Thé*[2] classera l'article de 1976 sur la mécanique du caféier et sa modélisation dans la catégorie « aléas ». Aux yeux du comité de rédaction qui a lu et publié cet article, l'accent n'est donc pas à mettre sur la méthode, sur la technique ou sur la modélisation proprement dite, mais sur le phénomène modélisé (la verse) et le problème agronomique considéré. La référence à cet article de de Reffye se trouve ainsi voisiner avec une référence à un article traitant de la sélection de cultivars pour la résistance à certaines maladies. Par ailleurs, de Reffye a l'opportunité de présenter son modèle de verse du caféier au huitième colloque international sur le café qui se tient justement par chance à Abidjan, du 28 novembre au 3 décembre 1977. Or, d'après le rapport de synthèse écrit par René Coste, alors secrétaire administratif permanent de l'ASIC[3], ce travail a été classé dans la catégorie « innovation agrotechnique en caféiculture » et le commentaire signale simplement qu'il s'agit d'une application de la théorie de la résistance des matériaux au caféier et que cela permet essentiellement « d'expliquer les modalités de la sélection du matériel végétal contre la verse du caféier »[4]. Enfin, en 1978, dans un index général et analytique des articles parus les années précédentes dans *Café, Cacao, Thé*, la revue classe ces articles de de Reffye dans la catégorie « café », à côté

[1] [Reffye (de), Ph., 1976], p. 267.
[2] [Café, Cacao, Thé, Vol. 21, n°2, 1977], pp. 86-88.
[3] Association Scientifique Internationale du Café.
[4] [Café, Cacao, Thé, vol. 22, n°1, 1978], p. 60.

d'autres catégories d'articles comme « cacao », etc. On voit donc que, dans ces articles, les techniciens et chercheurs agronomes de l'IFCC et de l'ASIC considèrent très prioritairement les seuls aspects agronomiques ainsi que les perspectives de sélection qu'ils peuvent promettre dans le seul cas du café.

Deux conditions pour « simuler »

Finalement, jusqu'à ce second article de 1976 sur la mécanique du caféier y compris, nous voyons que de Reffye considère que l'on a affaire à une simulation sur calculateur à deux conditions. D'une part, on peut dire que l'on « simule » sur calculateur à partir du moment où un modèle logico-mathématique conçu de façon fractionnée est le soubassement de computations numériques. D'autre part, il y a simulation selon lui si l'on a la capacité de visualiser les résultats de ces computations. Dès lors, le résultat visuel que présentent la machine et sa table traçante ressemble sensiblement au phénomène perçu par nos propres moyens perceptifs et à notre échelle : à bon droit il peut être dit le feindre, le simuler.

Il est un autre point à noter. De Reffye a produit ces travaux dans un grand isolement. Il ne cite pas alors les travaux de Dan Cohen ou de Honda même si ces derniers avaient déjà proposé leurs approches géométriques et graphiques de la simulation pour les formes ramifiées. Il n'est donc aucunement influencé par eux. De fait, il dispose d'un matériel informatique bien moins performant : il n'aurait pu prolonger leur travail tout à fait dans la même direction. À la différence de Cohen et Honda, de Reffye met de surcroît l'accent dès le départ sur les caractères morphologiques importants pour l'agronomie que sont les nœuds : ce n'est pas l'aspect visuel esthétique pour un argument théorique qui l'intéresse, mais ce qu'il veut, c'est arriver à une quantification précise du nombre de nœuds fructifères. Ainsi, il est obligé de mobiliser une connaissance botanique bien plus précise que Cohen et Honda.

Dans les travaux qui vont suivre, aux deux premières conditions déterminant l'usage du terme « simulation » d'ores et déjà choisies par de Reffye (fragmentation, visualisation graphique) vont se joindre d'autres conditions qui régulent depuis plus longtemps déjà l'usage de ce même terme dans d'autres domaines (mais elles apparaissaient aussi déjà chez Eden et Cohen). Dans le cadre d'une nouvelle problématique agronomique, la recherche opérationnelle va ainsi de nouveau inspirer l'agronome par une de ses autres autres méthodes de mathématiques descriptives : la simulation probabiliste.

CHAPITRE 24 - Premières simulations probabilistes : les travaux parallèles sur le cacaoyer (1976-1981)

Par la suite, de Reffye mènera en effet différents travaux en collaboration avec d'autres chercheurs de l'IFCC ou de l'ORSTOM. Comme sa compétence mathématique et informatique commence à être reconnue depuis ses premiers pas dans la modélisation de la croissance du caféier, ses collègues les plus proches trouvent à l'employer sur des problèmes, jugés voisins, de modélisation de rendement. Si bien qu'il ne passe jamais plus des deux tiers de son temps à la préparation de sa thèse d'Etat. Pendant ces quatre années qui le mèneront à la soutenance, un gros tiers de son travail est consacré soit à des études d'équilibres biologiques, soit à des problèmes de fertilisation des fleurs du cacaoyer ou du kolatier[1]. Ce sont les recherches sur le cacaoyer qui vont l'occuper le plus, en parallèle de son travail de thèse. La véritable nouveauté des travaux des années 1977-1978 va consister pour lui à se laisser à nouveau inspirer par les solutions mathématiques de la recherche opérationnelle, comme dans la première solution avortée de 1974, mais sans en revenir pour autant à la recherche d'un optimum. L'approche par dissociation de processus et par couplage informatique de sous-modèles, développée avec succès dans le modèle de 1976, sera de son côté maintenue pour sa puissance et sa précision. Mais de Reffye, même s'il n'y renonce pas tout à fait, ne cherchera plus systématiquement et en priorité à faire que ces sous-modèles soient des modèles mathématiques certains. Sur ce point précis de l'évolution de ses solutions techniques et de ses idées, nous pensons que c'est le problème spécifique aux cacaoyers qui l'a d'abord et progressivement incité à se proposer des modèles aléatoires tirés de la recherche opérationnelle et qu'il développera seulement ensuite pour le caféier, dans le cadre de sa thèse de 1979. Car, en 1977, le problème que pose le rendement du cacaoyer n'est clairement pas de même nature que celui du caféier. Ce n'est pas le même type de phénomène que l'on doit essayer de représenter mathématiquement. L'aléa y intervient de façon décisive. Nous allons rapporter ici les jalons essentiels de cette modélisation du cacaoyer de manière à comprendre les conditions dans lesquelles de Reffye sera amené à intégrer ensuite la simulation de type Monte-Carlo dans ses premières simulations de morphogenèse d'arbres. C'est en effet cette dernière intégration de formalisme qui le conduira à la conception du premier simulateur universel d'architecture d'arbres.

La sous-pollinisation chronique du cacaoyer

En ce milieu des années 1970, un problème bien connu des agronomes fait en effet l'objet de grandes attentions de la part des chercheurs de l'IFCC : la sous-pollinisation chronique du cacaoyer. Alors que ce problème ne se pose pas pour le café et qu'il paraît suffisant dans ce dernier cas de se pencher sur la seule croissance de l'arbre et l'apparition de ses fleurs, le contrôle des facteurs limitants du rendement du cacaoyer nécessite au contraire que l'on se penche d'abord sur les différents vecteurs environnementaux du pollen (vent, insectes…) afin de comprendre l'origine de cette sous-pollinisation. En 1975, des études déjà assez précises sur le transport de pollen avaient été effectuées par un entomologiste de l'IFCC (B. Decazy) et par des agronomes de l'Université de Yaoundé (F. Massaux, C. Tchiendji et C. Misse) au Cameroun. Ils

[1] Nous tirons cette information de notre entretien avec Philippe de Reffye [Reffye (de), Ph., Varenne, F, 2001].

employaient une technique expérimentale habituellement mise en œuvre en physiologie, écophysiologie et écologie, par ailleurs souvent corrélée à une modélisation de type compartimental : le suivi de flux, de substances ou d'agents par marquages radioactifs. Ils ont ainsi développé une technique de suivi de pollen par un traceur radioactif susceptible d'être contenu sans dommage dans la fleur du cacaoyer : l'isotope ^{32}P du phosphore. Après l'échec de leur première solution qui avait consisté à injecter cet isotope dans le tronc du cacaoyer (à cause de la trop faible dose d'isotope parvenant dans ce cas à la fleur et donc au pollen), ils en vinrent à mettre au point une technique plus adaptée, mais plus délicate, d'injection directe dans la fleur. Il leur devenait ensuite possible de mesurer directement, par compteur Geiger-Müller, l'intensité de la radioactivité parvenue sur les autres fleurs alentour. Cette radioactivité ne pouvait être due qu'au déplacement de grains de pollen ou d'insectes venant d'une fleur marquée initialement par les expérimentateurs :

« Toute fleur marquée retrouvée sur les arbres de la parcelle atteste soit la présence de grains de pollen, soit la simple visite d'un insecte contaminé. »[1]

Les conclusions qu'ils ont pu tirer des mesures étaient limitées étant donné que les visites infructueuses y figuraient également. De plus, cette mesure par compteur Geiger-Müller n'était pas un décompte ; ce n'était que l'évaluation d'une intensité de radioactivité :

« Cette technique n'est donc valable que pour apprécier l'intensité des visites d'insectes sur les fleurs. »[2]

Ainsi, avec une telle technique, il est impossible de reconstituer précisément les différents types de scénario de pollinisation qui sont la cause de ces mesures expérimentales. Les résultats permettent en fait surtout de chiffrer la décroissance des déplacements de grains de pollen en fonction de la distance à l'arbre initialement marqué. D'autre part, puisqu'il est néanmoins possible de mesurer la radioactivité des insectes eux-mêmes, il se confirme que toutes les espèces d'insectes rencontrées (au moins 25 en tout !) sont susceptibles d'être des agents pollinisateurs, et que le vent ne peut pas en revanche être considéré comme un agent décisif puisque ses expulsions de pollen, certes importantes, ne sont pas suffisamment directives, au contraire de celles des insectes. Les résultats de cette technique de suivi restent donc assez limités. La nature des agents vecteurs est mieux connue, mais il n'est pas possible d'évaluer le résultat global de la pollinisation, c'est-à-dire la distribution de pollen sur les styles[3], ni les processus précis grâce auxquels il y est apporté.

Simuler de manière probabiliste pour interpréter la structure des données de terrain

Pour cette étude, Philippe de Reffye collabore avec J.-P. Parvais, alors membre du laboratoire de biologie cellulaire de l'IFCC en Côte-d'Ivoire[4], et P. Lucas, généticien à l'IFCC. Les auteurs doivent tout d'abord mettre au point une nouvelle technique directe de comptage des

[1] [Massaux, F., Tchiendji, C., Misse, C. et Decazy, B., 1976], p. 167.
[2] [Massaux, F., Tchiendji, C., Misse, C. et Decazy, B., 1976], p. 167.
[3] Le style est, dans la fleur, la partie allongée du pistil qui se situe entre l'ovaire et le ou les stigmates.
[4] J.-P. Parvais est ingénieur agronome de formation et docteur en physiologie végétale. À cette époque, il travaille également sur des souches spontanées de café Robusta haploïde et sur leur possible utilisation pour l'amélioration des hybrides déjà existants à l'IFCC.

grains de pollen présents sur chaque style. Par des prélèvements faits au hasard sur des fleurs de cacaoyer entre janvier et avril 1977 et par des techniques de préparation et d'observation des styles de ces fleurs au microscope[1], le décompte peut être fait directement, à l'œil, par un assistant.

Or on sait que pour qu'une fleur de cacaoyer soit fécondée et donne une cabosse, il est nécessaire qu'en moyenne trente-cinq grains de pollen se soient auparavant déposés sur son style[2]. On sait également que les grains de pollen ont tendance à s'agréger dans la fleur avant d'être véhiculés sur une autre. Les grains arrivent ainsi souvent par agrégats sur le style récepteur. Ainsi on comprend tout de suite qu'il existe un très grand nombre de scénarios possibles pour une dépose fécondante d'au moins 35 grains au total, celle qui intéresse l'agronome : cela peut être un seul dépôt d'un agrégat de 35 grains ou, au contraire, plusieurs dépôts de quelques grains à chaque fois et menant finalement à un total de 35. Au vu de la méthode de comptage directe employée, la seule donnée expérimentale à laquelle les chercheurs ont accès est la distribution statistique du nombre total de grains arrivés sur le style. Or, cette méthode, aussi précise soit-elle, a pour effet de mélanger les grains qu'il aurait fallu distinguer en fonction de leurs scénarios originels de dépose. Mais c'est précisément ce type de scénario qui est inaccessible à l'expérience comme l'ont montré les tentatives antérieures de suivi des grains par marquage radioactif. Cette nouvelle méthode de mesure, malgré sa précision, confond donc deux processus qu'il faudrait distinguer. Sous l'impulsion de de Reffye et de sa maîtrise croissante des combinaisons de modèles mathématiques, les auteurs de l'article vont donc d'abord s'attacher à distinguer théoriquement, puis par simulation, ces processus. Ainsi, en collant au plus près de la séquence réelle (ou plutôt réaliste) des événements biologiques et écophysiologiques, il devient possible d'analyser les seules données accessibles et de les fractionner selon leurs sources probables. Il s'agit de tâcher de reconstituer les scénarios plausibles avec leurs probabilités propres.

Dans un premier temps, les auteurs cherchent à établir la loi de répartition finale des grains de pollen sur les styles. Avec leur méthode de comptage, ils sont capables d'établir la distribution empirique des nombres de grains de pollen par style. En même temps, ils déterminent la loi du processus qui se situe en amont de la dépose de pollen. Ils obtiennent ainsi une deuxième loi, la loi d'agrégation des grains de pollen (fréquence des effectifs en grains par agrégats), en se concentrant sur la partie des fleurs qui est émettrice de pollen, c'est-à-dire sur les étamines. Par une observation directe, là aussi, ils « dénombrent la fréquence des agrégats constitués de 1, 2, …n grains de pollen »[3] sur les étamines. En représentant graphiquement les distributions empiriques de ces deux « lois »[4] supposées, de Reffye reconnaît dans les deux cas « l'allure » d'une fonction de type $y = A.x^{\alpha}$. Ayant fait ces observations sur deux arbres distincts, il peut également dire que l'allure des distributions reste la même, quel que soit l'arbre, et que seuls les paramètres des lois mathématiques semblent changer. La loi d'agrégation, par exemple, serait donc une « caractéristique de l'arbre étudié »[5].

Dans un deuxième temps, les auteurs se penchent sur le processus central qui se trouve être mal connu parce qu'il est rebelle à toute mesure expérimentale précise : le transfert de grains de pollen entre fleurs, que ce soit par agrégats ou à l'unité. Il s'agit donc du processus à la fois biologiquement et chronologiquement intermédiaire entre le processus déjà modélisé de

[1] Ces techniques de prélèvement, d'écrasement de la préparation et de coloration sont décrites dans l'article commun de 1977, [Parvais, J.-P., Reffye (de), Ph. et Lucas, P., 1977] aux pages 253 et 254.
[2] [Massaux, F., Tchiendji, C., Misse, C. et Decazy, B., 1976], p. 165.
[3] [Parvais, J.-P., Reffye (de), Ph. et Lucas, P., 1977], p. 254.
[4] Le terme de « lois » est celui-là même des auteurs.
[5] [Parvais, J.-P., Reffye (de), Ph. et Lucas, P., 1977], p. 256.

l'agrégation initiale des grains dans la fleur émettrice, et le résultat final, également modélisé, de la répartition des grains sur le style de la fleur réceptrice[1]. *A priori*, on peut considérer que la composition de ce processus avec celui de l'agrégation des grains de pollen conduit au résultat final observé et déjà représenté par un modèle mathématique. Pour les auteurs, il est alors envisageable de modéliser ce phénomène de transfert dès lors qu'il est bien circonscrit par deux modèles en amont et en aval. Or, cette définition du modèle d'un processus par une méthode d'encadrement entre deux modèles explicites est particulièrement intéressante parce qu'elle autorise que l'on se passe de descriptions fines du processus en question : « il n'est pas nécessaire de préciser la nature de l'agent vecteur de pollen »[2]. Elle est en quelque sorte une définition en creux du modèle inconnu. Elle présente l'immense avantage d'en rester à une distance suffisamment lointaine, à une échelle suffisamment globale des processus élémentaires variés qui le composent, sans que, pour autant, on perde la possibilité de chiffrer précisément les phénomènes de fécondation. Ce qui était en revanche un obstacle pour les méthodes antérieures.

Cependant, même si ce type de modélisation nécessite peu d'hypothèses, il faut tout de même définir clairement et rigoureusement le sens biologique général de cette étape de transfert. À cette fin, les auteurs introduisent la notion de « passage efficace ». Ils la conçoivent comme désignant « tout phénomène qui aboutit au dépôt d'un agrégat de pollen »[3]. C'est alors la probabilité p_i pour qu'un style donné bénéficie de i « passages efficaces » qu'il leur est possible d'évaluer par cette méthode d'encadrement. Il leur est en effet aisé d'écrire explicitement ces probabilités en fonction des fréquences du nombre de grains de pollen par style et des fréquences des différents agrégats dans l'étamine, seules fréquences accessibles par l'expérience. La forme de la distribution ainsi indirectement obtenue se trouve être également celle d'une loi exponentielle (de forme $y = A.x^{\alpha}$). Les auteurs trouvent donc un ajustement chiffré pour cette loi de probabilité. À partir de cet ajustement, ils peuvent alors calculer ce qu'ils appellent des « valeurs théoriques » de chaque probabilité de passage efficace correspondant à chaque nombre de grains de pollen. Ces valeurs sont théoriques puisqu'elles sont trouvées indirectement, à partir de la méthode d'encadrement par les deux modèles en amont et en aval du processus global.

Une « vérification expérimentale » … par simulation

Par la suite, les auteurs proposent néanmoins ce qu'ils appellent une « vérification expérimentale » de ce modèle probabiliste à l'aide d'une simulation aléatoire. C'est-à-dire qu'ils sortent de la phase d'analyse des données expérimentales qui avait pur but de trouver, de cerner et d'ajuster le modèle probabiliste générant des valeurs intermédiaires non accessibles à l'expérience. Et ils entrent dans une phase de synthèse de données intermédiaires ayant pour fonction de vérifier *a posteriori* la pertinence du modèle.

Voici alors comment ils décrivent la fonction d'une simulation. Comme on le verra, par rapport aux deux premières conditions que de Reffye s'était fixées en 1976 pour que l'agronome-biologiste puisse estimer avoir recours à une « simulation sur calculateur », la nouvelle condition de « régénération de la variable aléatoire » semble bien nouvellement et directement transférée des méthodes de la recherche opérationnelle :

[1] Les auteurs indiquent qu'ils ne précisent pas la modélisation de ce processus au point de distinguer les « parts respectives d'auto- et d'allo-pollen », sachant en effet qu'une fleur peut recevoir le pollen de sa propre étamine sur son style. Dès lors que, du point de vue du résultat final, une telle précision peut sembler superflue, il ne leur semble pas utile de détailler le scénario jusqu'à ce point.
[2] [Parvais, J.-P., Reffye (de), Ph. et Lucas, P., 1977], p. 256.
[3] [Parvais, J.-P., Reffye (de), Ph. et Lucas, P., 1977], p. 256.

« La simulation consiste à restituer le phénomène observé à partir de la théorie choisie et de préciser l'influence des divers paramètres, c'est-à-dire de régénérer la variable aléatoire x_i, connaissant sa loi de distribution f(x) (qui est l'hypothèse de travail), à partir de nombres aléatoires. Pour la simulation, nous avons utilisé la méthode de la transformation inverse (Naylor et Balintfy, 1966). »[1]

Aux yeux des auteurs, la loi de distribution (ici l'expression générique « f(x) » vaut pour la loi de probabilité p_i de leur modèle) que la modélisation fractionnée et combinée a permis de mettre au jour empiriquement, puis d'ajuster à une formule mathématique close, doit, dans cette seconde étape, passer pour une « hypothèse de travail ». Cela peut paraître très surprenant parce qu'il s'agit en fait plutôt d'un résultat empirique faisant suite à une analyse de données armée de modèles intermédiaires. Mais il est vrai que, dans le cas de la phase de simulation aléatoire par régénération des événements dans leur individualité même, cette distribution ou loi de probabilité peut à son tour jouer le rôle symétrique d'une « hypothèse de travail » dans la mesure où il s'agit justement, dans cette seconde phase, de « régénérer » des données. Ces « données » nouvelles ne sont pas vraiment des « données » au sens où elles proviendraient directement de l'analyse empirique initiale. Elles sont des données « construites », si l'on veut bien nous passer cet oxymore, à partir du moment où la loi de probabilité n'est plus utilisée au niveau de sa distribution et de ses fréquences mais au *niveau des événements empiriques* qu'elle *pourrait*[2] déterminer en réalité. On ne cherche plus à résumer la loi de probabilité par une formule mathématique et on ne la traite plus comme telle ; on la fait fonctionner comme ce qu'elle est d'abord lorsqu'elle est confrontée à l'empirie : comme une loi des aléas, des événements aléatoires. C'est là que la simulation est perçue comme plus empirique que la formulation abrégée et abstraite de la loi de probabilité : en mettant de côté les paramètres de la loi mathématique et en revenant aux événements élémentaires et réalistes du phénomène qu'elle détermine. En ce sens, les auteurs considèrent qu'ils ont affaire à de nouvelles données empiriques même si cela se fait après la constitution d'un modèle mathématique de probabilité.

Un ouvrage de référence dû à des « simulateurs » en recherche opérationnelle

Enfin, la référence qui est faite ici à la fin du passage sus-cité est très significative. Il faut en dire quelques mots. Remarquons d'abord que ce sont bien les physiciens de la faculté d'Abidjan (Marchand et Lapasset), que de Reffye rencontrait souvent, ceux mêmes qui l'avaient conseillé dans l'achat de matériel, qui l'ont également initié à la simulation par ordinateur. Ce sont eux qui l'ont incité à travailler à partir du livre de Naylor et Balintfy[3]. Les recherches de de Reffye ont pu ainsi bénéficier de conseils prodigués par des physiciens eux aussi relativement exilés des centres de recherches majeurs en leur domaine.

---

[1] [Parvais, J.-P., Reffye (de), Ph. et Lucas, P., 1977], p. 258.

[2] Et non pas « qu'elle peut déterminer » et encore moins « qu'elle détermine en réalité » : pour une raison élémentaire de logique, la régénération ponctuelle d'événements aléatoires doit ne se présenter *a priori* que comme une reconstitution *réaliste* de la réalité et non comme une reconstitution de la réalité *telle qu'elle* s'est effectivement produite. En effet, la reconstitution aléatoire de l'aléa lui-même ne peut se donner qu'un réalisme faible comme idéal régulateur, c'est-à-dire un réalisme de ce qui est possible dans cette réalité visée, un réalisme du réel possible.

[3] Dans un échange personnel de courrier électronique (du 6 juin 2003), de Reffye nous a confirmé que c'était bien sous l'instigation de ces physiciens qu'il avait commandé et acheté cet ouvrage autrement non accessible à Bingerville.

L'ouvrage *Computer Simulation Techniques* est en effet un des premiers manuels assez complets de techniques de simulation mais dont les auteurs ont une origine principalement dans l'économie, la technométrie[1], le management ou la recherche opérationnelle. Lors de la parution de cet ouvrage fondateur, Thomas H. Naylor est professeur associé d'économie à l'université de Duke et Joseph L. Balintfy est professeur associé de recherche opérationnelle à l'université de Tulane. Les deux autres co-auteurs ne sont pas non plus des chercheurs dans les sciences de la nature : Donald S. Burdiock est assistant de mathématique à l'université de Duke et Kong Chu est professeur associé de management industriel à Georgia-Tech (*Georgia Institute of Technology*). Certes, cet ouvrage n'est pas le premier sur le sujet[2]. Mais il présente un panorama complet des techniques élémentaires de simulation numérique sur ordinateur (appelé *digital computer* par les auteurs). De plus, dans un premier chapitre, il exprime pour la première fois une réelle réflexion sur les différents usages épistémologiques de la simulation numérique : en exposant différentes nuances, les auteurs en trouvent 15 en tout.

Mais l'une des nouveautés majeures de cet ouvrage est qu'il présente la simulation numérique comme une nouvelle pratique scientifique à part entière, à côté des méthodes analytiques ou spéculatives traditionnelles, et qu'il développe ainsi quelques arguments d'ordre épistémologique. Pour ce faire, les auteurs ont d'abord recours à une philosophie des sciences positiviste, assez répandue à cette époque dans les pays anglo-saxons, celle de Hans Reichenbach. Selon cette épistémologie, le travail scientifique procèderait en quatre étapes : l'observation, la formulation d'hypothèses explicatives et prédictives sous la forme de modèles mathématiques, le traitement de ces modèles (résolutions logiques, calculs…) pour en obtenir des prédictions, enfin la constitution d'expérimentations pour tester la validité des modèles[3]. Les auteurs se demandent donc à quel niveau la simulation numérique peut bien apporter son soutien. Leur réponse est surprenante : à tous les niveaux, affirment-ils. Ainsi, et en substance, la simulation servirait notamment à pallier le défaut de données lorsqu'elles sont inaccessibles, que ce soient les données servant, en amont du travail scientifique, à l'induction[4], c'est-à-dire dans le processus de création d'une hypothèse théorique ou que ce soient les données servant, en aval, à la vérification de cette hypothèse théorique et de ses prédictions. Elle servirait également à pallier le défaut d'une expression mathématique du modèle par équations classiques ou bien encore l'absence d'une résolution mathématique analytique du modèle mathématique obtenu, quand bien

[1] Depuis 1959, il existe une revue appelée *Technometrics*, publiée par l'*American Statistical Association*, et qui s'attache à présenter les méthodes statistiques appliquées aux sciences physiques, chimiques et de l'ingénieur. Le choix de ce néologisme a été clairement inspiré par le terme *biometrics* issu pour sa part du cercle des biométriciens anglais du tournant du siècle jusqu'à R.A Fisher. La revue *Biometrics* de la Société Internationale de Biométrie existe pour sa part depuis 1944.

[2] On pourrait citer des ouvrages antérieurs qui sont patiemment répertoriés par [Naylor, T. H., Balintfy, J. L., Burdiock, D. S. et Chu, K., 1966] : par exemple l'article de Guy Orcutt, « Simulation of Economic System », de 1960, l'ouvrage de Charles P. Bonini de 1963 : *Simulation of Information and Decision Systems in the Firm*, celui de K. D. Tocher, de 1963 également : *The Art of Simulation*, ou encore celui de J. M. Hammersley et D. C. Handscomb de 1964 : *Monte Carlo Methods*. Il faudrait également rappeler que la revue *Operations Research* existe alors depuis 1952 et qu'elle répercute régulièrement les travaux plus fondamentaux des statisticiens ou de physiciens qui sont utilisateurs de la méthode de Monte-Carlo depuis 1945. Mais l'ouvrage de 1966 a ceci de marquant qu'il constitue une première synthèse raisonnée des différents usages de la simulation et des différentes techniques de mise en œuvre de simulations dans les domaines économiques ou industriels. Ces mises en œuvre offrent également l'avantage d'être présentées et structurées en référence constante avec un langage de programmation déjà devenu un standard : le FORTRAN. Enfin, les différents langages de simulation déjà disponibles à l'époque sont inventoriés et comparés.

[3] Nous résumons ici l'argument de la page 5 de [Naylor, T. H., Balintfy, J. L., Burdiock, D. S. et Chu, K., 1966].

[4] Dans le cadre d'un processus de création d'hypothèse de type baconien. Ce processus est totalement assumé comme tel par le philosophe Hans Reichenbach ([Reichenbach, H., 1951], pp. 25 et 35) que les auteurs citent à leur tour longuement, [Naylor, T. H., Balintfy, J. L., Burdiock, D. S. et Chu, K., 1966], pp. 4-5.

même il serait formulable par des équations générales classiques[1]. Ainsi, pour les auteurs de cet ouvrage, dès lors que la simulation numérique peut jouer un rôle à chaque étape du travail scientifique, il est incontestable qu'elle peut entre autres servir à « vérifier des solutions analytiques »[2], c'est-à-dire se substituer en quelque sorte à la quatrième étape du travail scientifique, celle de la vérification empirique.

La génération de nombres pseudo-aléatoires et la méthode de la transformation inverse[3]

Afin de simuler le tirage au sort d'événements successifs obéissant à une loi de probabilité donnée, il fallait d'abord disposer de nombres aléatoires. Or, il existe quatre sources possibles de nombres aléatoires : 1- les méthodes manuelles (lancers de pièces, de dés, roulettes…) ; 2- les tables numériques publiées de séquences aléatoires comme celle de la RAND Corporation[4], ces tables ayant été auparavant établies par un travail mettant en œuvre une des trois autres méthodes ; 3- les méthodes des calculateurs analogiques (fondées sur des processus physiques aléatoires comme le comportement d'un courant électrique) ; 4-les méthodes des calculateurs numériques. Les méthodes 1 et 3 peuvent donner l'impression de fournir des nombres aléatoires « vrais » mais elles présentent l'énorme inconvénient d'interdire la reproduction de la séquence aléatoire, ce qui est nécessaire pour la vérification des calculs, l'emploi de tests statistiques *a posteriori*, etc. La méthode 2 est très lente et ne peut pas être implémentée dans un calculateur numérique sans que lui soit communiqué ce gros désavantage puisqu'il faut stocker la séquence intégralement dans une mémoire (à cartes ou sur bandes magnétiques à l'époque, donc à accès très lents). Au milieu des années 1950, sous l'impulsion des premiers travaux de von Neumann en ce sens, puis de ceux d'un mathématicien de Berkeley, Derrick H. Lehmer, les méthodes purement numériques de génération (par récurrence) sont donc privilégiées. Ainsi, au début des années 1960, presque tous les calculateurs numériques disposent, dans leur code, d'une instruction (souvent RANDOM ou RND) qui leur permet d'extraire des nombres aléatoires par telle ou telle « variante des méthodes congruentielles de Lehmer »[5]. Le plus souvent, cette instruction met à

[1] La précision du propos épistémologique des auteurs s'épuise pourtant là. Et ils ne lèvent aucunement dans le détail le paradoxe qu'il y a à parler du caractère empirique des résultats d'une simulation. Il est vrai qu'une approche positiviste et empiriste globale les dispense, en un sens, de se poser la question, dès lors que ce qui est défini comme empirique est seulement ce qui prête globalement à deux types d'attitudes intellectuelles : soit à une induction, soit à un test de prédiction. Dans une perspective positiviste, ces deux attitudes intellectuelles du scientifique se retrouvent en effet aussi bien dans le rapport à l'empirie effective que face aux résultats de simulation sans qu'il y ait donc lieu de distinguer dans le détail ces deux rapports. Il s'agit là d'une position du problème proche de celle que Peter Galison nommera « épistémique ». C'est une position principalement attentive aux *moyens et aux pratiques de traitements* des résultats simulés : « stabilité, recherche d'erreur, réduction de variance, répétitivité », [Galison, P., 1996], pp. 143-144. Dans cette perspective, les identifications avec l'expérimentation réelle sont en effet plus aisées car paraissant de fait plus évidentes.

[2] [Naylor, T. H., Balintfy, J. L., Burdiock, D. S. et Chu, K., 1966], p. 9.

[3] Pour cet encadré, nous nous sommes inspiré du chapitre 3 de [Naylor, T. H., Balintfy, J. L., Burdiock, D. S. et Chu, K., 1966], pp. 43-67.

[4] En 1955, la RAND Corporation a publié aux éditions The Free Press, (Glencoe, Illinois) : *A Million Random Digits with 100,000 Normal Deviates*.

[5] [Naylor, T. H., Balintfy, J. L., Burdiock, D. S. et Chu, K., 1966], p. 46. En 1946, von Neumann et Metropolis avaient introduit la méthode dite du « milieu du carré » (*mid-square method*) qui consistait à prendre le carré du nombre aléatoire précédent et à ne conserver que les chiffres du milieu pour le nombre aléatoire suivant. Mais, en 1951, cette méthode avait été critiquée par le mathématicien américain spécialiste en analyse numérique G. E. Forsythe (qui, après avoir rejoint l'Université de Stanford en 1957, allait devenir le fondateur du département de *Computer Science* en 1965 et allait y former des générations d'informaticiens théoriciens comme Cleve Moler ou Donald Knuth) pour sa lenteur et pour ses qualités statistiques médiocres au regard des tests. Cette séquence pseudo-aléatoire ne pouvait donc totalement

disposition une loi de probabilité uniforme sur un intervalle quelconque de nombres entiers. C'est-à-dire que, du point de vue des tests statistiques, chaque nombre y est proposé avec une même probabilité.

L'objectif de la méthode de la transformation inverse est de permettre ensuite à la machine de proposer des nombres aléatoires successifs dont la distribution obéit à une loi quelconque connue et que l'on veut pouvoir simuler. Pour sa part, l'instruction RND (dans le cas du langage FORTRAN ou HPL par exemple) ne fournit donc que des séquences ayant des fonctions de densité de probabilité constantes. Le problème consiste à transformer une loi uniforme en la loi de densité f(x) voulue. Si l'on considère la fonction de densité cumulée F(x) de f(x), quelle que soit f(x), F(x) varie de façon monotone de 0 à 1. Si l'on pose F(x) = rnd, rnd étant un nombre aléatoire généré selon une loi uniforme, on définit ce faisant un et un seul x. Pour toute valeur de rnd, il est donc possible de trouver la valeur de x qui lui corresponde : $x = F^{-1}(rnd)$. Dès lors : $r = F(x) = \int_{-\infty}^{x} f(t)dt$ et $F^{-1}(rnd)$ est bien une variable qui a f(x) pour densité de probabilité.

Dans l'article de 1977 publié par les quatre chercheurs de l'IFCC, la méthode de génération de nombres pseudo-aléatoires (voir encadré) est textuellement reprise de l'ouvrage de Balintfy et Naylor. De manière très frappante, les notations elles-mêmes sont conservées. Comme il le fit dans le premier article de 1976, de Reffye propose ensuite un organigramme témoignant du traitement successif et imbriqué des modèles. Mais à la différence des deux programmes de 1976, celui-ci présente une simulation nettement aléatoire puisque c'est l'approche par la reconstitution des événements successifs dans leur caractère aléatoire même (et non dans une fonction temporelle certaine d'apparition) qui est choisie. Les auteurs résument eux-mêmes la séquence de l'organigramme :

« Dans un premier temps, on propose à l'aide de la loi des passages efficaces des nombres représentant les dépôts des paquets de grains de pollen suivant leurs fréquences naturelles.

---

remplacer le recours aux séquences de nombres aléatoires tabulées et publiées. Signalons qu'une séquence pseudo-aléatoire est une séquence construite par une méthode mathématique déterministe mais dont les propriétés statistiques sont satisfaisantes. Pour l'usage que l'on en fait, on peut montrer que la réussite à ce genre de tests suffit dans la plupart des cas. Entre-temps, en 1930, le mathématicien américain Derrick H. Lehmer avait soutenu à l'Université Brown une thèse remarquée sur des fonctions de Lucas (primitivement introduites par le mathématicien français Edouard Lucas (1848-1891) et décrivant des séquences de nombres entiers à récurrence linaire, c'est-à-dire dont le kième nombre est calculé arithmétiquement à partir des (k-1)ièmes nombres précédents, comme la « suite de Fibonacci ») et pouvant servir à des tests de primarité (propriété des nombres dits « premiers » de n'être pas divisibles par d'autres nombres que 1 et eux-mêmes). Par la suite, entre 1949 et 1951, alors qu'il est devenu membre du Département de Mathématiques de Berkeley, Lehmer propose une série de méthodes de génération de nombres pseudo-aléatoires par congruence. Ce sont des méthodes de génération arithmétique qui associent une récurrence linéaire à un calcul de congruence de façon à ce que le nombre trouvé reste toujours dans l'intervalle [0, m-1], m étant l'entier qui exprime la valeur module. Le nombre suivant est donc calculé comme étant le reste de la division entière par le module du résultat de la récurrence linéaire auparavant effectuée sur le ou les nombres pseudo-aléatoires précédents (que ce soit une récurrence linéaire additive, multiplicative ou mixte). Cette méthode l'a finalement emporté parce que ses avantages sont au moins au nombre de deux : technologique d'abord, mathématique ensuite. Technologique parce que si l'on s'arrange bien, dès lors que l'on a affaire à un ordinateur numérique, qu'il soit décimal ou binaire, les divisions peuvent être réduites à un simple retrait ou à un décalage de bits dans le codage des nombres, ce qui assure une rapidité de traitement quasi-optimale. Mathématique, parce qu'il se trouve que ce mode de génération inspiré des fonctions de Lucas se prête bien plus facilement à l'évaluation par les tests statistiques que la méthode du « milieu du carré » par exemple. Pour les informations sur la carrière de D. H. Lehmer, nous avons notamment consulté le site à vocation historique de l'Université de Berkeley, [Lehmer, D. H., 2001].

Dans un deuxième temps, ces nombres sont introduits dans une boucle où l'on choisit les amas de grains de pollen suivant leur distribution naturelle de fréquence. Lorsque la boucle est terminée, on a la somme totale des grains de pollen apportés sur le style. »[1]

Après le tirage d'un premier nombre aléatoire, la première étape de programme détermine donc aléatoirement le nombre total de passages efficaces qui vont affecter le style. Ensuite le programme entre dans une boucle : pour chacun de ces passages efficaces, le programme détermine aléatoirement (donc après tirage d'un deuxième nombre aléatoire) le nombre de grains qu'il y a dans l'amas apporté par ce passage efficace. À la fin de la boucle, le programme somme tous les grains apportés par tous les passages efficaces et donne le résultat.

Contingence des types d'événements aléatoires

On voit donc qu'il s'agit là de deux processus aléatoires imbriqués et non plus seulement de deux fonctions mathématiques certaines et fractionnées puis recomposées pas à pas selon la vraisemblance du récit biologique simplifié. Dans le cas du premier modèle logico-mathématique de croissance du caféier ou même de verse, où il s'agissait de combinaison de fonctions certaines, l'approche se faisait bien déjà par la succession des événements biologiques aléatoires, mais le type de l'événement suivant était exprimé de façon certaine. Les fonctions certaines prenaient en compte la moyenne de la date aléatoire et la certitude du type de l'événement suivant ; et c'était de ces deux certitudes dont témoignait le modèle logico-mathématique. Avec l'adoption des processus stochastiques, ce n'est donc pas l'approche par événements à proprement parler qui fait la nouveauté, mais une approche dans laquelle non seulement la date des événements est considérée comme aléatoire mais également leur type même. Les événements simulés sont aléatoires dans la mesure où ils sont indéterminés *a priori*. En effet, en 1976, on sait *quel type* d'événement va succéder au précédent puisqu'il s'agit d'une croissance simple : dans la première boucle, c'est la formation d'un rameau suivant qui succède à la formation du rameau précédent, dans la seconde boucle imbriquée, c'est également la formation du nœud suivant qui succède à la formation du nœud précédent, et rien d'autre. Par la suite, le comportement mécanique de la plante, qui est également pris en compte dans le second modèle de 1976, se trouve tout aussi uniment déterminé. Ce que l'on doit déterminer dans les premiers modèles logico-mathématiques, c'est donc seulement le laps de temps qu'il faut attendre pour que cet événement, dont le type précis est connu à l'avance, se manifeste. Car, en revanche, ce laps de temps est décisif pour déterminer le nombre de sous-événements (la formation des nœuds des rameaux) venant s'insérer dans la temporalité de l'événement majeur. Pour le premier modèle de 1976, c'est la formation des rameaux, pour le second modèle de 1976, c'est la mise en forme mécanique des tiges et des rameaux.

Ce que l'on gagne à simuler aléatoirement l'aléatoire

Dans l'article de 1977, les auteurs insistent pour finir sur l'intérêt qu'il y a à disposer de la capacité à régénérer intégralement les distributions des événements aléatoires et pas seulement leurs moyennes ou leurs variances, comme c'était le cas pour les modèles à équations mathématiques. La simulation a permis selon eux de « vérifier la justesse de l'analyse

[1] [Parvais, J.-P., Reffye (de), Ph. et Lucas, P., 1977], p. 259.

mathématique »[1]. C'est à ce titre qu'elle passe pour une expérience : elle a le pouvoir de corroborer une vision théorique mais dans la mesure même où elle est une reconstitution plus « exacte » du phénomène réel, reconstitution pourtant elle-même sous-tendue par l'hypothèse théorique. En effet, à partir de la représentation logico-mathématique, il est possible de comparer les résultats simulés avec les résultats théoriques, c'est-à-dire *deux produits de la même représentation logico-mathématique* initiale mais n'émanant *pas de la même interprétation* de cette représentation. Pour les « résultats théoriques », il s'agit d'une interprétation prioritairement abstractive, condensante, centrée sur les moyennes des phénomènes et sur les paramètres des modèles mathématiques (faisant abstraction du temps et de la diversité effective des types d'événements), alors que pour les « résultats simulés », il s'agit d'une interprétation constructive doublée d'un usage régénératif au niveau des événements temporels et ponctuels des mêmes modèles. Or, la restitution simulée est ici moins abstraite que le modèle mathématique abstractif puisqu'elle conserve et utilise au moins une des dimensions concrètes du phénomène initial comme support de sa manifestation : le temps. La représentation rencontre le phénomène et le touche pour ainsi dire au moins en cette dimension. La ressemblance d'aspect (si l'on veut bien considérer la temporalité d'un phénomène comme étant un de ses aspects) est donc plus grande dans la simulation que dans l'interprétation abstractive d'une modélisation mathématique faisant notamment abstraction du temps : la transfiguration abstractive de l'empirique y est moindre. Ce dualisme dans l'interprétation des modèles logico-mathématiques du programme autorise donc qu'une conséquence interprétative calculée du modèle en « vérifie » une autre.

Mais aussi, avec la simulation, la « représentation » est tout simplement plus « fidèle », selon les auteurs. Après avoir appliqué un test du χ^2 sur les résultats simulés, ils s'expriment ainsi : « On conclut que la simulation représente fidèlement les processus de pollinisation. »[2] Il en ressort plusieurs conséquences pour l'agronomie et la biologie. Ils en tirent notamment un argument en faveur de la mise en évidence d'une nouvelle caractéristique biologique du cacaoyer et que seule l'approche par simulation a permis de développer : « L'aspect des distributions est toujours identique et semble être une caractéristique du cacaoyer. »[3] Un travail sur la seule moyenne ou même sur la variance n'aurait pas permis une telle analyse. La forme de la distribution en elle-même devient un caractère génétique. Ils rappellent que ce genre d'approche permet aussi de ne pas préjuger de la nature des vecteurs de pollens impliqués. C'est ce qui fait sa puissance alors même que les données expérimentales sont difficiles d'accès. L'insertion, dans le modèle, de l'aléa propre à l'échelle d'observation du phénomène réel permet de disposer d'une représentation plus précise ou plus « fidèle »[4] de ce que l'on observe sans que l'on ait pour autant à décider de la nature des phénomènes microscopiques réels qui président à la manifestation macroscopique de cet aléa. Cette précision dans la représentation permet d'envisager l'évaluation des conséquences de divers traitements agronomiques qui, sinon, restaient difficiles à distinguer de l'hypothèse nulle. Dans une perspective pragmatique, cette majoration de la fidélité propre à la représentation scientifique ici construite se justifie par un gain en précision permettant lui-même un gain dans le pouvoir discriminateur des méthodes logico-mathématiques en général par rapport à celui de la

[1] [Parvais, J.-P., Reffye (de), Ph. et Lucas, P., 1977], p. 261.
[2] [Parvais, J.-P., Reffye (de), Ph. et Lucas, P., 1977], p. 260.
[3] [Parvais, J.-P., Reffye (de), Ph. et Lucas, P., 1977], p. 260.
[4] Ce qui pourrait paraître paradoxal à première vue. L'insertion de l'aléa dans le modèle n'est-elle pas gage d'imprécision ? Retrouvant sur ce point l'intuition de R. A. Fisher au sujet des modèles statistiques, des spécialistes en recherche opérationnelle, comme Dimitri N. Chorafas par exemple, ont assez vite considéré que l'approximation est affaire de décision eu égard à l'échelle privilégiée : dans certains cas, le modèle déterministe est une approximation et c'est le modèle stochastique qui est plus « voisin de la réalité », [Chorafas, D. N., 1966], pp. 32-33.

seule analyse multivariée, notamment lorsqu'il s'agit d'évaluer et de comparer diverses pratiques culturales.

La réception du modèle de simulation aléatoire pour le cacaoyer

Lors de la sixième conférence internationale sur les recherches cacaoyères, qui s'est tenue à Caracas du 6 au 12 novembre 1977, deux des auteurs de ce modèle de simulation (de Reffye et Parvais) présentent leur travail. Nous ne disposons ici d'aucun écrit qui pourrait directement rendre compte de ce qui s'y est dit. Mais, en se référant au rapport de synthèse, il est possible de se livrer, quoique avec prudence, à quelques suppositions au sujet de la réception de ce travail. Il est en effet instructif de remarquer dans quelle « session technique » les organisateurs du colloque ont choisi de le situer : il s'agit de la 7ème session, dite des « pollinisateurs »[1]. Comme dans le cas de la réception du modèle de croissance du caféier, le caractère innovant en ce secteur des choix de modélisation n'est pas tellement mis en avant. Mais au regard des noms des autres sessions techniques de la conférence, la particularité de l'approche de de Reffye ne semble effectivement pas pouvoir s'inscrire dans une catégorie qui lui conviendrait beaucoup mieux. Dans la session « pollinisateurs », on trouve cependant la référence à un autre travail mené au Brésil et qui propose une approche des pollinisateurs des cacaoyers par des méthodes de type « dynamique des populations ». Avec le modèle de simulation aléatoire que nos auteurs (et surtout de Reffye) y présentent également, c'est un voisinage qui semble *a posteriori* placer cet article de l'IFCC dans la nette filiation de la dynamique des populations alors même que ses auteurs ne s'en sont pas initialement réclamés. Ce rapprochement paraît en effet bienvenu puisque, dès 1945, nous l'avons vu, les processus aléatoires ont été utilisés par P. H. Leslie[2] dans cette discipline qui se trouve très proche, tant par ses méthodes que par ses objets, de la démographie et de l'écologie des populations. Ainsi le rédacteur (anonyme) du rapport de synthèse insiste tout de même assez nettement sur l'apport de la simulation dans l'approche du problème spécifique à la pollinisation du cacaoyer :

« En Côte d'Ivoire, J. P. Parvais, Ph. de Reffye et P. Lucas (IFCC) sont parvenus à une analyse mathématique des données d'observation sur la pollinisation libre chez le cacaoyer. L'observation de la pollinisation des styles et la connaissance de la loi d'agrégation du pollen permettent de définir précisément le mode d'action des vecteurs pollinisateurs. Des méthodes de simulation permettent de reconstituer exactement les phénomènes naturels. L'application du modèle et sa simulation permettent de contrôler les différentes modalités de la pollinisation d'un cacaoyer et de préciser l'éventuelle influence des facteurs externes sur elle. »[3]

---

[1] Voir [Café, Cacao, Thé, Vol. 22, n°1, 1978], p. 62. À ce colloque sur le cacao, il existe en tout treize sessions techniques : 1- résistance aux maladies, 2- épidémiologie, 3- protection des plantes, 4- virologie, 5- phytopathologie en général, 6- mirides, 7- pollinisateurs, 8- insectes déprédateurs secondaires, 9- sélection et agronomie, 10- pédologie, 11- économie, 12- technologie, 13- assistance technique et vulgarisation.

[2] Avec l'introduction de la simulation aléatoire dans la dynamique d'une population au moyen de processus stochastiques de naissance et de mort. Ces travaux ont été publiés par Leslie dans la revue « Biometrika ». Voir *supra*. Précisons ici que leur auteur avait d'abord calculé les occurrences des événements de ses modèles à la main avant même d'utiliser des calculateurs automatiques. Voir [Leslie, P. H., 1945] et [Leslie, P. H., 1958]. La communauté des chercheurs en dynamique des populations n'a donc pas attendu l'émergence des calculateurs numériques pour avoir l'idée non seulement de prendre en compte l'aléa mais aussi et surtout de le reconstituer, de le régénérer, dans ses modèles.

[3] [Café, Cacao, Thé, Vol. 22, n°1, 1978], pp. 62-63.

Ainsi cette restitution rapide figurant dans le rapport de synthèse semble assez fidèle à l'esprit des chercheurs impliqués, au mouvement de leur pensée et au sens de leurs choix techniques. Ce travail paraît donc avoir bénéficié d'une meilleure écoute que ceux qui ont porté sur la modélisation de la verse du caféier par exemple. Au regard des éléments fragmentaires dont nous disposons et que nous avons rapportés précédemment, il nous est possible de supposer que cet accueil plus « compréhensif » a tenu au fait que l'auditoire (constitué en majorité d'agronomes et de biologistes) était mieux préparé à la reconnaissance de la pertinence des modèles aléatoires. Par l'objet qu'il cherche à modéliser préférentiellement (le comportement aléatoire des insectes pollinisateurs), ce travail peut en effet s'apparenter très directement à l'étude dynamique d'une population et de son comportement de déplacement ou de flux, la population étant ici celle des insectes se déplaçant individuellement de façon plus ou moins aléatoire dans l'espace et dans le temps.

Toujours est-il que, dans ce contexte de recherche agronomique, c'est essentiellement l'objet d'étude, le cacao, et non les méthodes employées, qui prime encore puisque cet objet sert en retour à la classification des travaux présentés, comme ce sera également le cas, deux semaines plus tard, au colloque international sur le café d'Abidjan. C'est en effet de façon centrifuge, par rapport à la production finale en cacao et aux différents angles d'attaque de ce même problème, que les sessions de la conférence s'ordonnent les unes aux autres. Pour finir, indiquons que, dans la bibliographie analytique habituelle de la revue, l'article sur ce modèle aléatoire de pollinisation figurera cette fois-ci, de façon tout aussi peu convaincante, dans la catégorie « amélioration » alors que le second article de 1978 des mêmes auteurs[1], qui étendra la modélisation à la question des impacts sur le rendement en cacao, se trouvera rangé dans la rubrique « biologie ». Décidément, en cette fin des années 1970, la modélisation ni la simulation ne trouvent à se classer de façon stable et convaincante dans les rubriques de la revue de l'IFCC.

De la pollinisation au rendement : simuler pour discriminer les différents facteurs biologiques de la fructification

La connaissance des facteurs qui limitent la pollinisation des cacaoyers (rareté des « passages efficaces » de grains de pollen, raretés des amas de plus de 35 grains) n'est en fait qu'une partie de la connaissance nécessaire à une explication de la faiblesse et de la variabilité du rendement en fèves de cacao à l'hectare. À la différence de ce que l'on doit considérer pour le caféier, il faut ici tenir compte de la variabilité du nombre d'ovules par ovaire puis du taux de transformation des ovules en graines. Dans un article qui paraît en 1978, de Reffye, Parvais et Lucas poursuivent donc leur travail commun en s'adjoignant les services du généticien de l'IFCC G. Mossu. Alors que, pour le premier article de 1977 sur la pollinisation du cacao, de Reffye n'avait été que le deuxième cosignataire, il en est désormais le premier. Ce qui indique, d'après les pratiques habituelles de la revue *Café, Cacao, Thé*, qu'il en est le principal contributeur. De fait, cet article assez long (20 pages) manifeste un ample déploiement de modèles mathématiques de natures diverses. Ce travail frappe par la grande maîtrise dont il témoigne désormais dans l'insertion de ces modèles à des fins d'analyse biologique. Mais surtout, une particulière sensibilité mathématique aux diverses formulations équivalentes de ces modèles, à leurs conversions réciproques, à leurs combinaisons et à leurs inversions, nous fait penser que l'on a là affaire à un emploi des mathématiques qui n'est pas superficiel et de simple application. Comme ses articles

[1] Où figure, en plus des précédents (Parvais, de Reffye, Lucas), le nom du généticien de l'IFCC G. Mossu.

précédents, de Reffye avance pas à pas des hypothèses de sous-modèles pour chacun des sous-processus négligés jusqu'alors dans les travaux d'analyse multivariée. Et, au travers de cette incontestable maîtrise mathématique, on sent une capacité à adapter en souplesse les modèles à la réalité mesurable, ou simplement supposée, de chacun de ces micro-événements biologiques qui mènent l'arbre à sa fructification.

Nous ne reprendrons pas ici le contenu de cet article en détail puisque le procédé d'analyse y est le même que précédemment. Mais nous allons tout de même donner une image de la façon dont les sous-modèles y sont d'abord introduits séparément puis rendus ensuite compatibles entre eux par le calcul ou par la simulation. Le but principal des auteurs est de partir de ce qui est pour l'heure mesurable à l'issue de la fructification, à savoir la distribution du nombre de fèves (ou de graines de cacao) par cabosse, pour tirer la structure mathématique sous-jacente des différents facteurs qui déterminent cette distribution finale. Cela leur paraît la seule manière d'évaluer précisément la contribution de chacun de ces facteurs. Il serait en effet assez vain de se lancer dans une entreprise de sélection génétique de clones de cacaoyers sans disposer d'une telle connaissance.

Or, on peut déjà supposer que ce n'est pas la forme globale, parce que finale, de la distribution du nombre de fèves par cabosse qui est directement déterminée génétiquement. Elle ne peut être considérée comme un caractère génétique en soi puisqu'elle est la résultante de divers micro-événements combinés, dont certains même sont aléatoires. L'hypothèse de travail de de Reffye et de ses collègues ici consiste donc à affirmer qu'il est possible de trouver une échelle à partir de laquelle on peut se représenter des micro-événements suffisamment « élémentaires » et susceptibles, en se combinant, de contribuer effectivement à la distribution finale mesurable. L'article que nous évoquerons ici procède alors en deux temps principaux. Tout d'abord, il se livre à ce qu'il appelle une « analyse logique » de la courbe globale de fréquence des fèves par cabosse. Ensuite, il propose l'organigramme et la liste du programme de simulation prolongeant l'analyse.

L'« analyse logique » d'un macro-événement : le nombre de fèves par cabosse

De Reffye[1] veut donc explicitement « analyser » un histogramme dont certains prédécesseurs n'avaient considéré que la moyenne et la variance[2]. C'est-à-dire qu'il veut déceler les constituants de cet histogramme sans le résumer prématurément par un modèle probabiliste. C'est donc son profil tout entier (son « faciès » comme il le dit[3]) qu'il faut prendre en considération et pas seulement ses premiers moments statistiques (moyenne ou variance). Ce qui a pu ici inciter de Reffye à entrer dans la voie de l'analyse de l'histogramme en vue de la mise au jour de ses différentes contributions, c'est notamment la prise en compte du fait empirique mesuré et constaté selon lequel le faciès de la fréquence des fèves par cabosse est très complexe : il change souvent d'aspect. Parfois, il présente deux maxima ou pics, parfois il n'en présente qu'un. Quand il n'en présente qu'un, la courbe peut être soit à symétrie négative, soit à symétrie positive. Autant dire que le talent heuristique qui lui avait jusqu'à présent permis, à la vue de simples faciès de courbes

[1] Nous considérerons ici que c'est principalement de Reffye qui a imprimé sa structure rigoureuse à l'ensemble de ce travail collectif. Outre le fait qu'il s'est trouvé être le premier signataire de l'article de 1978, il y a dans ce travail, comme nous le verrons, une forte parenté avec ses travaux plus personnels de 1975 et 1976, aussi bien dans l'argumentation générale que dans la technique de modélisation

[2] [Reffye (de), Ph., Parvais, J.-P., Mossu, G. et Lucas, P., 1978], p. 251.

[3] [Reffye (de), Ph., Parvais, J.-P., Mossu, G. et Lucas, P., 1978], pp. 258 et 260.

empiriques, de suggérer des modèles mathématiques simples et ajustables se trouve ici en grande difficulté.

La seule voie lui paraît donc l'analyse puisque aucun scénario mathématique simple ne s'impose au niveau empiriquement accessible. Mais ce ne sera pourtant pas une analyse de variance. Ce genre d'analyse de phénomène global postule trop une homogénéité relative des sous-modèles constituants, donc leur commensurabilité, c'est-à-dire encore leur uniformité et leur compatibilité mathématique mutuelle. C'est précisément ce dont permet de se dispenser en revanche l'analyse par construction de sous-modèles postulés ou validés localement, c'est-à-dire validés à leur échelle. C'est là que de Reffye fait donc nettement le choix de la complexité. Il décide que ce phénomène est global, qu'il résulte d'une multiplicité de facteurs enchevêtrés et hétérogènes, autrement dit, qu'il est complexe. Bien sûr, il s'aide de considérations biologiques bien connues pour s'encourager en ce sens. Mais on voit bien que ces seules considérations biologiques n'auraient pas suffi. Car, alors même qu'elles étaient également connues de ses prédécesseurs, elles n'avaient pas été intégrées en tant que telles dans leurs modèles statistiques. C'est donc bien cette décision pour la complexité et sa modélisation, c'est cela qui l'amène à l'hypothèse implicite déjà évoquée et qui traverse tout ce travail : la supposition qu'il est pertinent de chercher une échelle micro-événementielle, dont il espère tirer des sous-modèles ajustables. En ce sens, le travail de 1978 témoigne d'un affermissement plutôt que d'un infléchissement de l'esprit qui avait animé de Reffye dès ses premiers travaux de 1975 et 1976.

Tout naturellement, c'est donc dans un ordre conforme à l'ordre chronologique réel de ces micro-événements biologiques supposés que de Reffye va successivement proposer les sous-modèles mathématiques censés les représenter. Dans un premier temps, il reprend les acquis de l'article de 1977 sur la loi de répartition du pollen sur les styles puisque toute fécondation commence par cet épisode. Mais pour la question qui est désormais posée (se pencher essentiellement sur l'aval de la fertilisation des ovules et non sur l'amont : la pollinisation), il devient possible de faire abstraction de la distribution des « passages efficaces » comme de la distribution des amas de pollen dans les étamines et de se contenter de la loi de répartition finale. Il est d'ailleurs instructif de constater que ce qui, en 1977, était à considérer comme un histogramme macro-événementiel global et à analyser en ses différentes contributions, devient, en 1978, un histogramme micro-événementiel élémentaire. De Reffye ne fait donc pas de l'analyse des phénomènes temporels une fin en soi. La définition de l'échelle élémentaire ou du micro-événementiel n'est donc pas pour lui une donnée *a priori*. Elle dépend essentiellement de l'échelle macroscopique à laquelle on a accès empiriquement mais aussi de la profondeur analytique à laquelle on veut ou on peut efficacement aller. Car cette profondeur analytique dépend elle-même des instruments disponibles et des méthodes de mesure plus ou moins nouvelles ou imaginables, et susceptibles d'être mobilisés pour une enquête à la nouvelle échelle interrogée, cela en vue de l'ajustement effectif des sous-modèles. Une telle modélisation n'est pas tant déterminée par ses objectifs que par les moyens empiriques qu'elle est capable de mettre précisément, c'est-à-dire mathématiquement, en évidence et en œuvre. Elle est, pourrait-on dire, *relativement déracinée* mais pas totalement déracinée comme le serait en revanche une modélisation dont les éléments seraient considérés comme purement fictifs (modèle statistique) ou transversaux (modèle d'allométrie). Elle est un échantillon, une coupe longitudinale (du point de vue du temps) dans les chaînes de causalité supposées s'enraciner plus profondément dans la physico-chimie. Cette coupe ne repose certes pas sur un fondement. En cela, elle est déracinée. Mais le mouvement causal qu'elle reconstitue n'est pas sans rapport avec la direction d'ensemble de ces causalités supposées qui vont du microscopique au macroscopique. Ce modèle de simulation n'est donc pas

uniquement descriptif. Il *explique* le phénomène *relativement* à l'échelle mésoscopique observable sur laquelle il se fonde. Alors que le modèle d'allométrie est statique puisqu'il ne fait pas intervenir la variable temps, le modèle de simulation est dynamique. C'est pourquoi on peut dire qu'il retrace une histoire : il réplique les détails du phénomène dans leur historicité.

Un formalisme peut en invalider un autre

De Reffye reprend ensuite la formulation de sa loi de répartition des grains sur les styles. Mais il insiste cette fois-ci nettement sur la forme analytique de cette loi qu'il rapporte à la formulation de la « loi de Pareto », usuelle en économie et en sociologie des inégalités. Car, entre-temps, il a continué de s'instruire en statistiques descriptives, notamment auprès des volumineux manuels du démographe et statisticien de l'INED Gérard Calot[1]. C'est dans une librairie universitaire d'Abidjan qu'il avait fait auparavant l'acquisition de ces ouvrages suffisamment classiques pour être diffusés assez largement[2].

La loi de Pareto

Dans son *Cours d'économie politique* (1896), le physicien, puis économiste et sociologue italien Vilfredo Pareto (1848-1923) se penche sur les questions que pose la répartition de la richesse dans une société donnée. Il propose alors une loi mathématique susceptible de représenter la proportion des personnes qui ont un revenu supérieur à une valeur x choisie. Cette loi peut s'exprimer par une fonction de densité f(x) :

$$f(x) = \frac{a}{x_0}\left(\frac{x_0}{x}\right)^{a+1}$$

Or, elle admet comme moyenne

$$\bar{x} = \frac{a}{a-1}x_0$$

et comme variance[3]

$$V = \frac{a x_0^2}{(a-2)(a-1)^2}$$

[1] À la fin des années 1960, Gérard Calot était Administrateur au service de la démographie de l'INSEE ainsi que professeur de statistiques et probabilités à l'ENSAE (Ecole Nationale Supérieure de la Statistique et de l'Administration Economique). Comme il se doit, dans son fameux *Cours de probabilités* comme dans son *Cours de statistiques descriptives*, respectivement publiés en 1967 et 1969 (et que de Reffye connaît et cite dans l'article de 1978), son approche et ses exemples sont nettement inspirés de problématiques économiques. En, 1972, Calot deviendra directeur de l'INED (Institut National d'Etudes Démographiques).

[2] Cette information nous a été donnée lors d'un entretien personnel avec Philippe de Reffye que nous avons eu par courrier électronique le 6 juin 2003.

[3] Nous avons repris ici les notations de [Reffye (de), Ph., Parvais, J.-P., Mossu, G. et Lucas, P., 1978], p. 255.

Grâce aux relevés empiriques dont ils disposent, de Reffye et ses collègues trouvent donc à chiffrer les inconnues a et x_0 de la loi de Pareto. Ils procèdent par passage à la fonction cumulative F(x), qu'ils linéarisent ensuite par le logarithme et à laquelle ils appliquent la méthode classique de régression suivant les moindres carrés. Or, l'intérêt que représente cet ajustement à une loi mathématique exprimable analytiquement est majeur pour de Reffye. En effet, d'une part l'ajustement de ce modèle sur les mesures en champ est excellent, puisque l'on obtient un coefficient de corrélation qui se situe entre 0,95 et 0,99[1]. D'autre part, les valeurs que l'on obtient pour le coefficient de Pareto 'a' donnent pleinement raison *a posteriori* au choix qui a été fait d'abandonner les méthodes d'analyse biométrique par la moyenne et la variance :

« La moyenne n'existe donc que si a est supérieur à 1, et la variance n'existe que si a est supérieur à 2. Dans les conditions de pollinisation de Bingerville et de Divo, a est toujours inférieur à 2 ; l'étude de la pollinisation moyenne des arbres et leur comparaison d'après ce critère n'a donc pas de sens. »[2]

Par conséquent, il serait aberrant de procéder ici à une analyse de variance. Plus loin, de Reffye montre que le paramètre 'a' est même plutôt situé entre 0,42 et 0,71. C'est-à-dire qu'il est inférieur à 1. Ce qui indique qu'il n'y a même pas de moyenne ! En effet, en appliquant la formule analytique et exacte de la moyenne valable pour une loi de Pareto (voir encadré), on trouverait une valeur négative alors que la valeur de la distribution f(x) est évidemment toujours positive. Ce qui est manifestement aberrant.

C'est la notion même de moyenne mathématique qui n'a donc pas de sens dans ce cas de figure. Il n'y a pas là de miracle, bien sûr. Cela est dû au fait que, dans le cas empirique qui nous préoccupe, et avec les valeurs de 'a' que l'on trouve, la distribution diminue très rapidement lorsque x croît. Il n'y avait donc pas de sens à aborder ce problème avec l'outil mathématique de la moyenne statistique ou de la variance. Car, si l'on fait confiance au modèle mathématique ajusté, la moyenne n'est mathématiquement pas définie ; et les chercheurs précédents ont eu tort de la supposer définie par principe. Certes ce modèle de Pareto n'est ajusté que sur une partie de la courbe. Mais c'est précisément la partie qui est à prendre en compte pour la question posée : il s'agit des cas rares où x est grand, c'est-à-dire où il y a suffisamment de grains de pollen pour qu'il y ait ensuite une éventuelle fructification. On est donc là en présence d'un phénomène certes mesurable mais dont on a désormais compris qu'il serait très malvenu de recourir à la formalisation de la moyenne pour le représenter et l'expliquer. Il s'agit d'un cas assez peu fréquent où le recours à un formalisme de modélisation permet de disqualifier nettement le recours à un autre type de formalisme.

Sans vouloir prétendre l'expliquer tout à fait, nous est-il possible de saisir sur ce cas particulier le sens de l'incohérence mathématique qui se produit là ? Si la réponse existe, elle se trouve dans ce que de Reffye et ses collègues font précisément lorsqu'ils tentent de convertir le formalisme de la loi de Pareto dans le formalisme qui fournit l'expression de la moyenne d'une distribution de densité donnée. C'est dans la tentative de conversion d'un formalisme en un autre que l'on est conduit à une distorsion manifeste signifiant le rappel à l'ordre d'un certain nombre d'hypothèses mathématiques implicites, d'habitude oubliées, mais qui sont nécessaires pour

[1] [Reffye (de), Ph., Parvais, J.-P., Mossu, G. et Lucas, P., 1978], p. 254.
[2] [Reffye (de), Ph., Parvais, J.-P., Mossu, G. et Lucas, P., 1978], p. 255.

l'utilisation légitime du second formalisme. La tentative de convertir le premier formalisme en le second a ainsi imposé des restrictions axiomatiques que le premier formalisme ne s'impose pas de lui-même. C'est cette tentative avortée qui fait bien comprendre *où* le nouveau formalisme se distingue avantageusement de l'ancien. Encore faut-il que ce formalisme disqualifiant soit considéré comme efficace par ailleurs. Ce qui est le cas de par la précision des ajustements aux données de la loi de Pareto. Ainsi il se peut qu'un formalisme disqualifie l'usage d'un autre formalisme.

Une « démonstration » par simulation ?

Ensuite, lorsque les grains sont sur les styles, il y a un autre type de micro-événement biologique qui survient : la plus ou moins grande « efficacité » du grain de pollen[1]. Or, on ne sait comment représenter la distribution des grains efficaces dans la population totale des grains : l'expérience n'y a pas accès. Mais il y a deux modèles simples et crédibles qui peuvent *a priori* s'imposer. Si le pourcentage de grains de pollen efficace est constant et ne dépend pas du nombre de grains déposés sur le style, on peut montrer directement, par simple calcul algébrique, que la composition des deux lois, loi de Pareto et loi linéaire simple, donne encore une loi de Pareto de même coefficient comme résultante. La loi de répartition des grains de pollen efficaces serait donc de même forme que la loi de répartition des grains de pollen présents en totalité sur le style. Mais si la distribution de grains de pollen efficaces suit une loi binomiale, il n'est en revanche pas possible de la composer analytiquement avec la loi de Pareto. Toutefois il est possible d'en tirer la même conclusion : la loi de Pareto conserve sa forme.

Pour « démontrer » que cela est aussi valable pour le cas hypothétique d'une loi binomiale régissant l'efficacité du grain, de Reffye procède alors à une simulation. Avec un petit bout de programme employant la méthode de transformation inverse reprise de Naylor et Balintfy, il fait tirer au hasard par la machine un échantillon de 1500 fleurs pollinisées en lui faisant composer pas à pas (et non pas de façon analytique) les deux tirages aléatoires, le premier réglé par la loi de Pareto (présence des grains sur le style), le second réglé par la loi binomiale (efficacité ou non de chaque grain tiré). Le résultat de la simulation est présenté sous forme graphique (grâce à l'usage de la table traçante) et est publié tel quel dans l'article de 1978 pour avoir force de preuve : le faciès résultant est bien visiblement et également celui d'une loi de Pareto[2]. Toutefois de Reffye hésite à affirmer que la simulation seule vaut comme *démonstration* en tant que telle. Voici exactement ce qu'il écrit :

« Si q(x) [loi de répartition des grains efficaces dans le total des grains de pollen] est une loi binomiale, on peut démontrer, par simulation*, que la courbe du pollen efficace est peu différente de celle obtenue pour la loi q(x) = kx [à pourcentage de grains efficaces constant] (fig. 7) [référence à un graphique où sont affichées sur le même repère orthonormé « nombre de styles (ordonnée) portant un nombre donné de grains (abscisse) » les deux courbes simulées pour les deux lois]. En effet, les catégories ont la même espérance mathématique kx et la loi binomiale répartit symétriquement les catégories par rapport à cette espérance. »*[3]

[1] On dit qu'un grain de pollen sur le style est efficace si : « 1- il germe, 2- il pénètre dans l'ovule, 3- il empêche toute pénétration ultérieure dans cet ovule, qui n'est donc plus disponible », [Reffye (de), Ph., Parvais, J.-P., Mossu, G. et Lucas, P., 1978], p. 256.
[2] [Reffye (de), Ph., Parvais, J.-P., Mossu, G. et Lucas, P., 1978], p. 257.
[3] [Reffye (de), Ph., Parvais, J.-P., Mossu, G. et Lucas, P., 1978], p. 257. C'est nous qui soulignons.

Dans la seconde phrase, de Reffye se sent donc obligé d'ajouter ce qu'il juge être le véritable argument explicatif (« en effet » écrit-il) : même s'il ne peut l'exprimer de façon analytique, il nous demande de voir de façon évidente, donc par une espèce d'intuition mathématique mais non visuelle ni graphique cette fois-ci, que les catégories grains efficaces/grains non efficaces sont traitées indistinctement par la loi de Pareto. Les deux processus étant apparemment indépendants, l'espérance de leur composition semble donc devoir être la composition de leurs espérances.

Analyse logico-mathématique des différents faciès par les sous-modèles

L'analyse logique se poursuit ensuite mais sans encore recourir à une simulation globale sur calculateur puisqu'il va s'agir de tâcher de confirmer l'hypothèse de la succession/combinaison des micro-événements d'une façon d'abord logique et mathématique. C'est-à-dire qu'en travaillant sur l'allure des différentes courbes[1] résultant des différentes conditions biologiques du cacaoyer (essentiellement quant à la sous-pollinisation[2]), il est possible d'évaluer *a priori* l'importance des contributions des sous-modèles à la courbe finale et ainsi de prouver, au moins qualitativement[3], la présence permanente, mais d'influence chaque fois variable, des micro-événements. Or, c'est bien cette influence variable qui permet d'expliquer la variation du faciès de la courbe résultante. Cette première énigme semble donc résolue au moyen de l'approche par sous-modèles successifs et combinés. Ainsi est-on invité à repérer graphiquement la vraisemblable mais décisive contribution de la loi de Pareto (suscitant le premier pic de la courbe résultante) en cas de sous-pollinisation, ou bien encore la présence d'un maximum de fertilité pour l'ovule (manifesté par un second pic modélisable par une simple loi binomiale) en cas de pollinisation saturante.

Le fait que les micro-événements biologiques deviennent tout à tour des conditions limitantes dans l'expression du phénomène global, cela parce qu'ils sont eux-mêmes tour à tour portés à saturation selon les conditions biologiques particulières qui y prédisposent, peut littéralement *se voir* et devenir l'objet d'une intuition mathématique devant l'allure des courbes intermédiaires que permettent désormais de construire les sous-modèles mathématiques de ces micro-événements. La courbe résultante paraît alors totalement interprétée du point de vue de sa constitution tout à la fois mathématique et biologique, puisque chaque micro-événement possède en même temps un sens biologique et une représentation mathématique manipulable à son échelle. Il devient donc possible que l'analyse fasse, pour finir, place à la synthèse, grâce à une combinaison logique des sous-modèles.

Simulation : l'analyse pour la synthèse

Comme de Reffye l'a montré dans le paragraphe précédent, il faut partir de considérations qualitatives au vu de l'allure de la courbe résultante pour distinguer les contributions respectives de chaque sous-modèle. Or, il est possible d'aller plus loin en ce sens. Il apparaît que l'on peut

[1] La courbe globale étudiée est, comme nous l'avons dit, celle qui représente le nombre de cabosses ayant un nombre donné de graines par cabosse. C'est elle qui peut présenter trois types de faciès différents.

[2] Il y a d'autres particularités biologiques qui font également varier l'importance relative des sous-modèles les uns à l'égard des autres de façon quantitative, notamment le flétrissement des cabosses. Nous ne les restituerons pas ici dans le détail.

[3] Comme on fait une analyse mathématique qualitative de certains phénomènes physiques par des considérations générales sur l'allure de leur courbe représentative.

chiffrer ce faisant certains paramètres des sous-modèles en présence : c'est notamment le cas du paramètre 'a' de la loi de Pareto qui peut se mesurer indirectement sur la courbe résultante tracée à partir des données entrées dans le calculateur. Dans une deuxième étape, le programme demande que l'on entre dans sa mémoire les coordonnées des points que l'utilisateur a donc auparavant décelés lui-même sur le tracé fourni à l'issue de la première étape. Employant ensuite les équations des sous-modèles, reformulées pour l'occasion de façon à exprimer les paramètres inconnus en fonction des nouveaux points mesurés sur la courbe simulée, le programme fait le calcul des paramètres des sous-modèles. La phase de synthèse proprement dite peut alors commencer, puisque tous les sous-modèles sont enfin interprétés et chiffrés. De Reffye justifie cet objectif comme suit :

« Il reste toutefois à effectuer une simulation pour vérifier l'exacte concordance entre le théorie et l'observation, à savoir que les paramètres et les lois mises en évidence sont nécessaires et suffisants pour expliquer les processus biologiques observés. »[1]

Notons que le dispositif logico-mathématique de sous-modèles mathématiques successifs et imbriqués logiquement au moyen de l'infrastructure du programme est ce que de Reffye appelle, dans ce contexte, la « théorie » de la récolte de fèves. Selon le passage précédent, la simulation a donc clairement pour fonction de permettre à la « théorie » d'être « vérifiée ». C'est là reprendre le propos qui avait déjà été le sien à ce sujet dans l'article de 1977. Mais l'autre intérêt de cet extrait est de nous proposer un équivalent assez précis de ce qui est appelé une « vérification » de théorie par simulation. Une telle vérification consiste dans le fait que la simulation rend manifeste la « concordance » entre le dispositif logico-mathématique et les phénomènes mesurés en champ. De Reffye ne parle pas ici de représentation mais seulement de « concordance » : il faut que la simulation montre que l'on a d'abord trouvé les bons facteurs biologiques (« nécessaires et suffisants ») et qu'on les a ensuite reliés pertinemment à des modèles mathématiques (donc eux aussi « nécessaires et suffisants ») censés leur correspondre. L'utilisation de la formule courante « nécessaire et suffisant » indique l'idée que l'on a transposé le problème biologique dans un contexte logico-mathématique avec le double souci, pour ce transfert, d'une économie de l'information (« nécessaire ») et toutefois d'un maintien intégral de l'information pertinente (« suffisante »), comme cela peut se produire entre deux ensembles qui sont en relation bi-univoque ou de bijection. La théorie n'a donc pas pour objectif de restituer tout le détail en tant que tel, mais de restituer quand même au besoin *tous les détails* terme à terme qui seront utiles à l'objectif de contrôle et d'explication. Conformément à son étymologie, le terme « explication » retrouve alors tout son sens d'un dépliement suffisamment détaillé et approfondi des phénomènes micro-événementiels « impliqués » (repliés sur eux-mêmes) dans le phénomène global. Comme on le voit, dans ce cas de figure, la « théorie » formelle n'est donc plus à penser prioritairement comme une formule mathématique succincte et abstractive.

Le sens de la méthode de Monte-Carlo

La suite du programme est plus classique puisqu'elle reprend, comme l'article de 1977, les techniques de simulation de Naylor et Balintfy. Il faut cependant noter que de Reffye choisit de lui

[1] [Reffye (de), Ph., Parvais, J.-P., Mossu, G. et Lucas, P., 1978], p. 264.

donner pour la première fois son nom générique de « Méthode de Monte-Carlo » et de la rapporter ainsi plus directement à son histoire récente :

« On appelle méthode de Monte-Carlo les techniques de simulation faisant appel aux nombres au hasard pour représenter des processus stochastiques.

Ces méthodes résolvent numériquement des calculs pratiquement irréalisables [référence à l'ouvrage collectif de Naylor et Balintfy]. »[1]

Ce passage est instructif dans la mesure où il oscille explicitement entre l'interprétation historique de la méthode (résoudre numériquement des calculs pratiquement irréalisables) et l'usage passablement différent qui en est fait dans le contexte de l'article : faire « appel aux nombres au hasard pour représenter des processus stochastiques ». Dans l'explicitation de leur démarche, les auteurs ne choisissent donc pas clairement entre une interprétation de la méthode de Monte-Carlo comme méthode de calcul et son interprétation comme méthode de représentation fidèle des phénomènes. Pourtant nous pouvons dire que la nature même de leur travail indique que c'est bien la deuxième interprétation qui a été d'emblée la leur, cela dès le départ. En effet, de Reffye n'a pas d'abord cherché une formulation mathématique générale du phénomène de production de fèves pour ensuite tâcher de la résoudre numériquement par des processus stochastiques ; mais il a tout de suite fait le choix de la complexité, comme nous l'avons vu. C'est-à-dire qu'il a choisi d'affirmer le caractère composite du phénomène considéré au regard de la connaissance biologique plus détaillée et morcelée que l'on pouvait en prendre. Ce n'est qu'ensuite qu'il a introduit des sous-modèles particuliers, que l'on pourrait dire d'*essence probabiliste*, pour les faire simuler par tirage de nombres au hasard.

À la fin de l'article de 1978, de Reffye et ses collègues vont fournir l'organigramme du programme en HPL effectuant ce qu'ils appellent la « simulation intégrale » de la récolte en fèves par cabosse. Cependant, il est important de remarquer ici que ce qui est simulé n'est pas de même nature que ce que de Reffye avait déjà simulé en 1976. Dans le cas de la fructification du caféier, en effet, le résultat du programme était le dessin d'un profil de caféier avec ses rameaux et ses nœuds, certes stylisés, mais disposés de façon topologiquement, mécaniquement et biologiquement cohérente sur la feuille de papier finale. Le résultat était donc un dessin ressemblant de façon stylisée à un profil réel de caféier. En revanche, dans ce programme de 1978 consacré au cacao, comme dans celui de 1977, ce qui est simulé n'est au fond qu'un tableau de chiffre ou, au mieux, et comme le dit un des sous-titres de 1978, la courbe empirique elle-même : il s'agit d'une « simulation de la courbe par la méthode de Monte-Carlo »[2]. En ce sens, dans le cas du cacaoyer et de sa fructification, puisqu'il n'a pas été nécessaire de faire figurer l'architecture et la géométrie proprement dites de l'arbre, la simulation reste d'abord et avant tout une restitution numérique des divers décomptes empiriques que l'on peut y faire par l'analyse. C'est une des raisons pour lesquelles de Reffye et ses collègues hésitent à interpréter

[1] [Reffye (de), Ph., Parvais, J.-P., Mossu, G. et Lucas, P., 1978], p. 264. Dès 1949, on s'aperçoit que parmi les usagers de la méthode de Monte-Carlo, il y a un consensus (dont Naylor et Balintfy se feront l'écho ensuite en 1966) sur l'évolution des usages de cette méthode : on serait passé d'un usage de la méthode comme technique de résolution numérique stochastique de problèmes formalisés de façon déterministe (avec les travaux de von Neumann, Ulam et Metropolis) à son usage comme technique de traitement de problèmes directement stochastiques. Voir [Marshall, A. W., 1954]. En fait, dès l'origine, il est possible d'interpréter le recours à cette technique également dans ce deuxième sens. Ce qui montre son ambivalence originelle et sa difficulté à entrer dans les catégories épistémiques classiques.

[2] [Reffye (de), Ph., Parvais, J.-P., Mossu, G. et Lucas, P., 1978], p. 264.

explicitement, ainsi que nous l'avons vu, le recours à la simulation numérique de type Monte-Carlo comme un appel à une technique de représentation.

Toujours est-il que la conclusion de cet article précise ce qui peut justifier le recours à une simulation des aléas de la pollinisation pour l'interprétation des courbes de rendement. Avec une mise en évidence quantifiée des micro-événements affectant le phénomène général au moyen de sous-modèles ajustés, il devient possible de *séparer* nettement les micro-facteurs contrôlés par la génétique de ceux qui le sont par les pratiques culturales ou par la pollinisation. Ainsi :

« Pour l'interprétation des essais agronomiques et des essais comparatifs utilisés pour l'amélioration du cacaoyer, il est donc indispensable de séparer, dans l'analyse de la production, les parts dues respectivement aux méthodes culturales, à la qualité génétique du matériel mis à l'épreuve et aux conditions de pollinisation. »[1]

Ici encore, la fonction de la modélisation intégrale, fragmentée et vérifiée par simulation, est bien de permettre une analyse crédible de résultats empiriques enchevêtrés et dont les paramètres de contrôle sont inconnus ou non connus de façon suffisamment précise et quantitative. Il s'agit d'orienter la tâche de l'agronome et de l'améliorateur vers des indicateurs tout à la fois biologiques et quantitatifs plus sûrs, et qui leur donneront une prise plus efficace et plus rigoureuse sur les phénomènes complexes du vivant. Si la simulation est une reconstruction pas à pas, c'est pour permettre de « séparer ». La synthèse ne se fait donc pas au détriment de l'analyse. Bien plutôt, la synthèse simulante, directement fondée sur le dispositif logico-mathématique, devient une vérification de l'analyse mathématique et logique préalable. Comme on l'a vu, des simulations intermédiaires peuvent et doivent d'ailleurs intervenir localement avant la simulation intégrale, dans la mesure où il faut tâcher de valider les sous-modèles mathématiques, à leurs niveaux, un par un et les uns après les autres, avant de les combiner logiquement par le programme informatique.

L'achat du tout nouveau modèle d'HP : un enjeu financier, humain et technique

Par ailleurs, il faut considérer que ce travail assez complexe sur le cacao n'aurait pu voir le jour si la station de Bingerville n'avait pas disposé en permanence de son propre calculateur. En 1978, J. Snoeck a laissé sa place de chef de la Division de génétique de l'IFCC en Côte-d'Ivoire à l'ingénieur agronome, et créateur de l'Arabusta, J. Capot. Ce dernier, comme son prédécesseur d'ailleurs mais de façon plus décisive, sent l'importance et l'urgence qu'il y a à disposer à demeure d'un matériel de calcul automatique performant, notamment pour la poursuite des recherches sur le café entreprises par de Reffye. Il va donc céder à ses instances et il va faire franchir le pas à la direction de l'IFCC[2] : à partir de 1978, la station de Bingerville disposera d'un calculateur HP 9825 acheté aux frais de l'IFCC[3]. Mais cet achat coûteux n'a pas été sans quelque contrepartie pour de Reffye. C'est notamment une des raisons pour lesquelles on peut *a posteriori* expliquer la dispersion de son travail à cette époque, alors même qu'il œuvrait déjà intensément à sa thèse d'Etat. En effet, connaissant le montant, relativement élevé pour un seul chercheur, de cet

[1] [Reffye (de), Ph., Parvais, J.-P., Mossu, G. et Lucas, P., 1978], p. 273.
[2] En 1979, au début du mémoire de sa thèse d'Etat, de Reffye remerciera personnellement J. Capot pour son implication dans cet achat décisif.
[3] Un tel achat représentait en effet un investissement assez lourd. Dans la fiche technique du HP 9825 disponible sur le site du HP Museum, on trouve que le prix de base du HP 9825 était de 5900 dollars en 1976. La table traçante coûtait pour sa part 485 dollars. Voir [Hicks, D., 1995-2002], plus précisément : http://www.hpmuseum.org.hp9825.htm.

investissement en matériel, et connaissant les missions pragmatiques de l'IFCC, on comprend que de Reffye n'ait pas eu par la suite le loisir de se consacrer tout seul et à temps plein à l'unique problème de la modélisation du caféier, celui qui deviendra son sujet de thèse. Au vu d'un tel investissement financier consenti par l'IFCC, c'était en effet la moindre des choses que de lui demander en contrepartie qu'il mette aussi à la disposition de ses collègues les performances de ce matériel. De Reffye était avant tout un ingénieur. Cette réciprocité de sa part était donc plus ou moins expressément attendue par la direction. De Reffye s'en faisait de toute façon lui-même un devoir. Mais comme il avait été l'un des seuls à faire véritablement l'effort de se former, sur le tas, à l'emploi délicat de ce genre de machine et à sa programmation, cela signifiait que c'était tout à la fois lui-même et son appareil qui devaient se mettre au service des projets des autres ! En quelque sorte, comme dans tous les secteurs où la compétence informatique devenait rare à mesure que les possibilités de la technique se développaient, c'était d'abord lui même qui devait fonctionner en « temps partagé » et non la seule machine, comme c'était en revanche déjà le cas à la même époque chez les physiciens ou les gestionnaires utilisateurs de grands calculateurs. C'est en quoi l'on peut aussi mieux comprendre que, tout en travaillant à sa propre thèse dans le contexte de l'IFCC, de Reffye n'a en fait jamais cessé de jouer le rôle d'un ingénieur de recherche à part entière pour ses collègues.

La technologie du HP 9825

La technologie électronique du calculateur HP 9825 bénéficie des avancées qui sont intervenues dans les semi-conducteurs au cours des années 1960. Comme dans le HP 9820, mais à un niveau plus intégré, le processeur 16 bits, doté d'une horloge à 8Mhz et de fabrication HP emploie la nouvelle technologie des transistors dits NMOS. Il s'agit d'une technologie dans laquelle l'effet transistor ne se produit plus à la surface des semi-conducteurs comme c'était en revanche le cas pour les premiers transistors de type Shockley. La technique *Metal-Oxyde Semi-conductor* (MOS) ne présente donc plus l'inconvénient d'exiger une qualité de surface parfaite et permet en retour une plus grande intégration des circuits logiques en bits par unité de surface[1]. Les 16 bits du processeur représentent en effet ici le nombre de portes logiques qui y sont intégrées : à chaque bit ou porte logique correspond une fonction logique élémentaire. Dans le cas du HP 9825 et à la différence du HP 9820, pour augmenter la vitesse, le processeur est en quelque sorte réparti. Il est conçu autour de trois puces ou « *chips* » hybridées entre elles avec des petits circuits et dont l'une (*Binary Processor Chip*) dirige les deux autres (*Input Output Chip*, dotée de 12 micro-instructions, et *Extended Math Chip*, dotée de 15 micro-instructions). La puce principale reconnaît pour sa part 59 micro-instructions. On peut comparer cela aux 75 micro-instructions que le processeur unique du HP 9820 pouvait reconnaître. Il y a donc un choix nouveau dans l'architecture du processeur qui manifeste une volonté de spécialisation et de répartition du calcul en différents types de *processing* dès la structure matérielle. Enfin, dans le HP 9825, les adresses sont codées sur 15 bits et peuvent donc renvoyer à 64 kilo-octets de mémoire. En version de base, la mémoire morte (*Read-Only Memory* : ROM) est de 24 kilo-octets et la mémoire vive (*Random-Access Memory* : RAM) de 8 kilo-octets environ (en fait 6844 octets)[2].

[1] Voir sur ce point [Ramunni, G., 1989], p. 146.
[2] Pour ces données techniques, nous nous sommes notamment appuyé sur [Hicks, D., 1995-2002], http://www.hpmuseum.org.hp9825.htm.

Il est intéressant de noter qu'en 1976, HP a hésité à donner le nom de « *computer* » à cette machine. La firme américaine a en fait d'abord opté pour la dénomination de « *programmable calculator* ayant des capacités similaires à celles d'un *computer* » en modifiant ainsi légèrement l'appellation qui lui était habituelle pour ce genre de machine depuis 1968 : « *desktop calculator* ». Les responsables du marketing de HP ont ainsi voulu signaler que cette machine pouvait être employée par une personne *a priori* « peu entraînée » en ces matières. C'est dire combien, dans l'esprit des gens, le terme de *computer* était encore principalement réservé à des machines lourdes, compliquées et exigeant des équipes techniques de physiciens et d'électroniciens qualifiés. Mais d'autre part, comme le rapporte D. Hicks, l'historien de la firme HP, l'introduction sur le marché américain d'une nouvelle machine portant le nom de *computer* devait préalablement faire l'objet d'une demande d'autorisation (difficile à obtenir) auprès du Département de la Défense, étant entendu que la divulgation et la mise à disposition de tels engins semblaient une affaire particulièrement sensible du point de vue militaire[1]. En fait, dès 1977, la machine est vendue avec un manuel qui la présente comme un « *desktop computer* ». Et, dans le catalogue HP de 1977, la firme ne cache pas sa volonté de la faire entrer en concurrence avec ce que l'on appelait à l'époque des « *mini-computers* ». On y lit qu'« elle est conçue principalement à destination de l'ingénierie, de la recherche et des statistiques »[2].

Pour ce qui est du HP 9825 proprement dit, il s'agit d'une version nettement améliorée du HP 9820 (voir encadré), modèle de calculateur dont de Reffye a disposé jusqu'alors depuis 1976 grâce à la générosité des physiciens de la faculté d'Abidjan. C'est le HP 9825 qui a entre-temps remplacé le modèle 9820, cela à partir de 1976. Le clavier est devenu un véritable QWERTY, conforme au modèle anglo-saxon des claviers de machine à écrire. L'écran dispose de 32 diodes électroluminescentes au lieu de 16. Alors que le HP 9820 fonctionnait encore avec un lecteur de cartes perforées, le HP 9825 propose un lecteur de cassette magnétique capable de stocker jusqu'à 250 kilo-octets de données et de programmes. Le langage de programmation HPL bénéficie de son côté de nombreuses innovations qui le font se rapprocher du langage Basic. Il devient notamment possible de définir des tableaux de données, c'est-à-dire l'équivalent de vecteurs ou de matrices, pour peu que l'on ait auparavant défini leurs dimensions maximales avec l'instruction DIM (exemple : « DIM N[10,15] » pour la préparation en mémoire vive d'un tableau de 10 lignes et 15 colonnes de chiffres). Or, de Reffye va tout de suite sentir l'utilité de cette nouvelle fonctionnalité pour son programme de 1978 puisqu'il va se servir de cinq matrices de ce genre. Les limites de ces définitions de tableau comme du programme en mémoire ne dépendent que de la mémoire vive (RAM[3]) alors disponible : 6844 octets pour la version de base, et jusqu'à 31420 octets pour les versions optionnelles. Pour sa part, le programme de de Reffye fait 2200 octets et sa liste (qui est publiée encore dans son intégralité) occupe 74 lignes. Donc, même si ce programme paraît assez court et simple, il occupe déjà près d'un tiers de la mémoire vive de base. Il est donc essentiel de comprendre que sans cet instrument, l'équipe de de Reffye n'aurait pu mener à bien ses simulations pas plus que de Reffye lui-même n'aurait eu l'idée de les concevoir.

[1] Voir [Hicks, D., 1995-2002], http://www.hpmuseum.org.hp9825A.htm.
[2] Cette phrase est tirée du catalogue HP de 1977, section « *Calculators and Peripherals* », p. 528. On trouve une reproduction partielle de ce catalogue et une reproduction intégrale du manuel de spécification du HP 9825 sur le site de D. Meier qui lui est entièrement dédié [Meier, D., 2003].
[3] *Random Access Memory*.

Bilan sur les premières simulations probabilistes

Dans ce chapitre, nous avons vu comment de Reffye apprenait à développer des techniques de simulation aléatoire pour refléter des scénarios de comportements animaux. À ce titre, la simulation a pu lui servir comme test empirique de certains sous-modèles analytiques. Elle rejoint par là en quelque manière l'expérience. Entre-temps, de Reffye a également poursuivi sa méthode de convergence des modèles. Comme nous l'avons vu, il procède en fait par une sorte d'accrétion ou d'agrégation des sous-modèles les uns aux autres au moyen de l'infrastructure logicielle. S'appuyant sur la rapidité de calcul de l'ordinateur et sur sa faculté à tirer des nombres au hasard, il a en particulier quitté les approches axées sur les comportements moyens et il a fait suivre à la machine des destins individuels croisant chacun plusieurs événements aléatoires. Au passage, au moyen d'un sous-modèle non-linéaire calibré, il a montré la source de l'erreur que l'on peut faire lorsque l'on conserve le formalisme de l'approche biométrique classique : les moyennes ou les variances ne sont parfois pas définissables, si l'on veut rester fidèle aux phénomènes.

Dans les différentes applications qui suivront, l'emprunt aux méthodes de la recherche opérationnelle va encore s'étendre. Suite à des demandes diverses de ses collègues de l'IFCC, on voit de Reffye travailler en réseau et dans le cadre d'une recherche immédiatement appliquée, au contraire de tous ses prédécesseurs en simulation des plantes. Il apprend ainsi à adapter ses modèles à la demande. Toutefois, le succès des modèles de simulation pour le cacaoyer sera mitigé ou indirect, alors qu'il sera patent et direct pour le caféier. Saisir les raisons de cette différence, c'est comprendre pourquoi la voie empruntée pour le caféier va finalement être privilégiée. Cela occasionnera notamment un retour à une approche de simulation graphique, ce que ne nécessitait pas en revanche la problématique des cacaoyers. D'une problématique de distribution temporelle, typique de la recherche opérationnelle, de Reffye sera donc renvoyé à une problématique de distribution spatio-temporelle où l'agrégation des différents formalismes des sous-modèles devra être la plus large possible. C'est là que la simulation donnera toute son ampleur et marquera définitivement sa différence d'avec les modèles de la biométrie, en devenant tout à la fois graphique et probabiliste.

CHAPITRE 25 – Les applications des simulations fractionnées (1977 – 1981)

Par la suite, alors même qu'il poursuit son propre travail de recherche sur l'architecture et la croissance du caféier, de Reffye ne va pas cesser de collaborer avec J.-P. Parvais et quelques autres collègues sur cette question de la pollinisation du cacaoyer. Pas plus qu'il ne va cesser de travailler sur le caféier avec le nouveau chef de la Division d'agronomie de l'IFCC en Côte-d'Ivoire, qui n'est autre que J. Snoeck et dont on a vu qu'il avait laissé entre-temps sa place de chef de la Division de génétique à J. Capot. Sachant cela, il ne nous est pas possible de rendre compte d'une façon strictement chronologique de ces trois séries de travaux que de Reffye mènent continûment et en parallèle à partir de 1977. Comme nous le verrons toutefois, de par un usage qui deviendra systématique de la simulation de « représentation » notamment dû à une nette inflexion des problématiques agronomiques de de Reffye vers la botanique, il est manifeste que la thèse de 1979 va marquer une rupture supplémentaire dans les méthodes traditionnelles de la biométrie par rapport aux travaux antérieurs et contemporains que nous avons commencé à présenter. Alors même que de Reffye poursuivra une recherche plus fondamentale sur la modélisation et la représentation idoine du caféier d'un point de vue botanique, il sera cependant constamment happé par d'autres travaux dont la philosophie restera celle qu'il leur avait imprimé à leurs débuts.

En un sens donc, si ces travaux de 1977-1981, qu'il effectue en constante collaboration avec ses collègues, sont encore bien principalement fondés sur ses propositions conceptuelles et techniques, ils correspondent toutefois à un certain usage du calculateur qui n'était déjà plus vraiment le sien au regard de ses travaux de thèse soutenus en 1979. C'est la raison pour laquelle nous exposerons ici, pour finir sur cette période ivoirienne, les développements qu'ont connu ses premiers travaux sur le cacaoyer puis sur le caféier (à partir du modèle de 1976) quand bien même ils seraient intervenus pendant, voire après, son travail de thèse, c'est-à-dire jusqu'à son départ de Côte-d'Ivoire, en 1981. Ils constitueront en effet davantage des prolongements à partir des problématiques agronomiques et des modèles déjà existants en 1976 que des innovations techniques ou méthodologiques proprement dites. Nous nous permettrons donc ici une petite entorse à la chronologie. Et, pour la commodité de l'exposé comme pour la compréhension historique qui en résultera, à condition que l'on n'oublie pas la contemporanéité de ces différentes recherches qui seront successivement exposées, nous choisirons de valoriser pour un temps la différence d'esprit qui commence à s'accuser fortement, à partir de 1978, entre ces diverses tâches qui incombaient à l'ingénieur et au chercheur qu'était tout à la fois de Reffye. Après quoi, dans les chapitres suivants, nous reviendrons sur la substance même du travail de la thèse d'Etat commencé pour sa part en 1977 et dont nous avons dit qu'il marquait une rupture, mais sans nier les parentés et les continuités qu'on lui verra avec les recherches antérieures.

Entre 1978 et 1980 donc, les travaux de modélisation de de Reffye qui avaient précédé cette période vont connaître des prolongements tant au niveau de la pollinisation du cacaoyer que du côté de la fructification du caféier. Du point de vue de l'histoire des techniques et des sciences, la première question qu'il est pertinent de se poser à leur égard est celle de savoir si cette nouvelle approche par modélisation fractionnée et simulée présentait véritablement les avantages qu'elle

prétendait avoir, notamment au vu des conclusions optimistes, voire passablement triomphalistes, des articles successifs de 1976, 1977 et 1978. La seconde question est celle de l'impact de ces travaux dans les recherches de ses collègues : comment furent-ils reçus ? Comment furent-ils effectivement utilisés ? Afin de pouvoir en décider sur ces questions, il nous faut rendre compte des problématiques scientifiques et des solutions techniques qui sont intervenues rapidement dans le cadre de prolongements précis ou d'applications étendues.

La simulation détaillée du trafic des insectes : un problème de « file d'attente » (1980)

Tout d'abord, pendant ces années-là, et toujours en collaboration avec le biologiste J.-P. Parvais, de Reffye poursuit son travail sur la pollinisation complexe du cacaoyer. Il apparaît de plus en plus nettement que les deux cacaoyères expérimentales appartenant à l'IFCC et situées en Côte-d'Ivoire (Divo et Bingerville) ont des rendements bien différents parce qu'elles subissent des conditions de pollinisation différentes. Ces différences sont probablement dues à des dissemblances dans le flux et dans les espèces d'insectes pollinisateurs. Mais la source de ces dissemblances n'est pas repérable précisément par les techniques de modélisation antérieures. Par rapport à la méthode adoptée en 1977, il faudrait donc ne plus se contenter d'un simple décompte du total des insectes présents dans chaque fleur. Il serait au contraire nécessaire de détailler encore plus et de prendre en considération la diversité de leurs espèces et de leurs comportements. En effet :

« Le pourcentage d'insectes capturés dans une fleur peut dépendre de modalités différentes. Ainsi un temps de stationnement long dans la fleur associé à un faible nombre de visites peut donner un taux d'insectes par fleur identique à celui fourni par un grand nombre de visites associé à un temps de stationnement court. »[1]

La collaboration avec un entomologiste comme N. Coulibaly[2] paraît donc indispensable pour se donner les moyens de distinguer au moins les espèces les plus représentatives de cette diversité. Or, comme l'indique encore sa position de premier signataire de l'article de 1980[3], c'est encore de Reffye qui propose ici un modèle mathématique pour traiter cette question particulière. Comme nous allons le constater, la forme mathématique en est nouvelle même si elle se rattache toujours aux modèles de simulation aléatoire de type Monte-Carlo. Allant au rebours de l'article de 1978, il apparaît clairement que la modélisation doit se pencher à nouveau sur l'amont de la fructification des cacaoyers, c'est-à-dire sur la pollinisation. Ce faisant, elle impose d'aller plus loin encore dans le détail des vecteurs de pollens. La seule notion de « passage efficace » avait suffi dans l'article de 1977 parce qu'il s'agissait d'interpréter la *forme* de la répartition finale de grains de pollen sur les styles et le type général de trafic d'insectes qui en était une des sources. Or désormais, il s'agit de restituer, avec leurs différents scénarios, les *divers micro-événements* types qui peuvent conduire à une répartition finale donnée. Il faut donc que ce modèle soit susceptible

[1] [Reffye (de), Ph., Parvais, J.-P., Coulibaly, N. et Gervais, A., 1980], p. 83.
[2] N. Coulibaly a suivi une formation initiale d'ingénieur agronome au début des années 1970. En 1974, il soutient un DEA d'entomologie à l'Université Paul Sabatier de Toulouse. Son mémoire de DEA rend alors compte d'une pratique d'élevage d'insectes sur milieu artificiel. Une fois nommé chargé de recherche à l'IFCC, sur les pas de l'entomologiste J. N'Guyen Ban et en collaboration avec lui, Coulibaly applique cette nouvelle technique d'élevage artificiel (en remplacement de la technique classique d'élevage sur milieu naturel reconstitué) à une espèce de chenilles qui sont des ravageurs du cacaoyer (*Earias biplaga*), cela afin de mieux en connaître la biologie. La plupart de ses travaux toucheront par la suite la question des ravageurs ou des pollinisateurs du cacaoyer.
[3] [Reffye (de), Ph., Parvais, J.-P., Coulibaly, N. et Gervais, A., 1980], p. 83.

de permettre la discrimination entre les espèces d'insectes ou, tout au moins, entre les différents ordres d'insectes pollinisateurs en fonction de leurs habitudes de trafic entre fleurs et en fonction de leurs durées de stationnement dans les fleurs. C'est en formulant de cette manière le problème que de Reffye a l'idée de le rapporter aux questions de « files d'attentes » telles qu'elles sont traditionnellement modélisées en recherche opérationnelle depuis les années 1950.

Un troisième transfert de méthodes venues de la recherche opérationnelle

Dans l'article de 1980, ce transfert de concepts et de méthode est opéré par de Reffye de la façon suivante. Tout d'abord, dans l'introduction, il énumère distinctement les cinq questions que l'agronome peut légitimement se poser et chercher à résoudre :

« Le présent travail se propose d'établir une méthode de calcul précise du trafic des insectes pollinisateurs du cacaoyer et de répondre aux questions suivantes :

1° Quels sont les insectes responsables de la pollinisation en Côte-d'Ivoire ?

2° Combien d'insectes visitent une fleur en une heure à une période déterminée ?

3° Combien de temps restent-ils dans la fleur ?

4° Quelle est la proportion de ces insectes qui passe effectivement sur les styles de fleurs ?

5° Avec quelle probabilité cèdent-ils du pollen s'ils en ont ?

Les quatre dernières questions peuvent être résolues par la théorie des files d'attente bien connue dans les méthodes de la 'recherche opérationnelle'. Nous espérons ainsi proposer une méthode efficace et facile d'emploi pour évaluer le trafic et l'efficacité des insectes pollinisateurs du cacaoyer. »[1]

La première question peut en effet être réglée au moyen de techniques de prélèvement de fleurs, de reconnaissance et de décompte direct (au microscope) de tous les insectes présents dans ces fleurs. Dans une première section qui suit immédiatement l'introduction, l'article expose les pourcentages mesurés. C'est donc bien en ayant la première question en tête que l'équipe de de Reffye extrait les seules données accessibles qu'il lui faut ensuite analyser. Il en résulte un tableau de fréquences des insectes, par espèces, dans les fleurs. Cette « donnée » empirique rend compte des insectes capturés à un moment donné mais pas de leur trafic ni de leur durée de stationnement. Tout l'enjeu est donc bien de partir de la réponse à la première question, qui est de source assez directement empirique, pour savoir si l'on peut répondre aux quatre suivantes qui, elles, semblent exiger une analyse de ces données globales. Là encore la modélisation intervient lorsque les méthodes de mesure ou d'expérimentation ne peuvent accéder directement aux paramètres les plus décisifs pour la compréhension des phénomènes et leur contrôle futur. À partir de données extraites sur des instantanés en quelque sorte, il faut tâcher de reconstituer les scénarios temporels qui y ont conduit. Dès l'introduction, de Reffye annonce, mais sans le montrer à ce niveau-là, que c'est aux méthodes de la « recherche opérationnelle » d'offrir des solutions à ces questions. Or, cela peut paraître surprenant puisque jusqu'alors, et de façon assez consensuelle, la recherche opérationnelle avait été définie de la façon suivante : tout type d'étude d'un organisme ou d'une organisation comportant des interactions multiples entre hommes et machines[2]. La recherche opérationnelle est en ce sens très proche d'une technique scientifique de

[1] [Reffye (de), Ph., Parvais, J.-P., Coulibaly, N. et Gervais, A., 1980], p. 83.

[2] En 1954, Ellis A. Johnson, alors directeur du Bureau de la Recherche opérationnelle auprès de l'Université Johns Hopkins, la définit ainsi : « La recherche opérationnelle consiste à préparer plusieurs solutions en vue du fonctionnement

gestion et de régulation de toute forme d'action humaine complexe et d'envergure : que ce soit une bataille navale, un conflit aérien et/ou terrestre, une entreprise au sens large ou strict, de production de biens marchands ou autre. Il est donc important de se pencher sur cet article d'agronomie en se demandant notamment dans quelles conditions il justifie ce qu'il faut bien qualifier ici de transfert de méthode d'un champ d'étude technico-humain à un champ biologique ou écologique. Mais avant de nous intéresser plus particulièrement aux justifications apportées pour ce transfert, nous pouvons déjà noter que c'est la première fois qu'une telle liste de questions est explicitement établie au début d'un article dont de Reffye est un co-signataire. Il faut sans doute dès maintenant voir là une certaine imprégnation des méthodes de l'ingénieur en recherche opérationnelle dans les méthodes de l'agronome améliorateur. De façon générale, à l'issue de nombreuses réunions préalables avec les membres et collaborateurs de l'entreprise dont l'ingénieur doit analyser le comportement logistique (ou autre), il lui faut en effet mettre au jour une série de questions bien identifiées susceptibles d'être résolues par le programme de modélisation qu'il va proposer. Comme dans toute activité d'ingénierie, il faut un accord collectif préalable sur le « cahier des charges » que devra remplir le produit fini, c'est-à-dire sur les performances finales qui devront *a priori* caractériser le produit conçu par les ingénieurs. Dans le cas de la recherche opérationnelle, la différence tient au fait que ce que les ingénieurs « fabriquent »[1] consiste non en un produit matériel mais en un « modèle » de nature mathématique et logique.

Comment alors est justifié ce transfert de méthodes et de concepts ? Pour l'agronome, au vu de ce qui est énoncé successivement dans l'article, il faut d'abord considérer le fait qu'un insecte visite une fleur comme étant assimilable au passage d'un client à une station qui lui délivre un service. Cette assimilation que l'on pourrait juger quelque peu anthropomorphique ne pose pas de problème puisqu'elle se produit en fait sans cesse dans la recherche opérationnelle dès ses débuts. Le terme de « client » par exemple est indifféremment employé pour désigner un homme, une matière première, une voiture, un camion venant livrer sa marchandise, un appel téléphonique arrivant à un standard ou un produit semi-fini se déplaçant sur une chaîne de production[2]. Cette indétermination native dans le terme de « client » propre à la recherche opérationnelle tient au fait que ce concept ne tienne justement compte que de ce qui semble universel dans tous les phénomènes de files d'attentes (*Queuing Systems* en anglais) : des entités individuelles ayant affaire à une gestion du temps particulière uniquement liée au fait qu'elles doivent se trouver pendant un certain temps (« durée de stationnement ») à un certain endroit (à la « station » délivrant ou se faisant délivrer le « service ») et que d'autres entités de même type sont en

---

d'organismes mettant en jeu des hommes et des machines et à comparer la valeur de ces solutions », [Mc Closkey, J. F. et Trefethen, F. N., 1954, 1957], p. 6. En 1961, suivant les suggestions de A. Kaufmann, R. Faure et ses collègues la définissent de façon assez similaire : « Si, comme le propose M. Kaufman [référence à l'ouvrage 'Méthodes et modèles de la recherche opérationnelle', Dunod, 1959 d'Arnold Kaufman, alors mathématicien et professeur à l'Université de Louvain], on convient d'appeler phénomènes d'organisation ceux qui incluent les relations actives entre hommes, produits et machines (ces mots étant pris au sens large), il ne serait pas déraisonnable de nommer les mathématiques 'insolites' (le qualificatif est de M. Guilbaud) qu'utilise continuellement la recherche opérationnelle : *mathématiques des phénomènes d'organisation* […] Finalement, la recherche opérationnelle apparaît comme l'ensemble des *méthodes d'analyse scientifique des phénomènes d'organisation* », [Faure, R., Boss, J.-P. et Le Garff, A., 1961, 1967], pp. 10-11. Dans le dernier ouvrage collectif auquel Robert Faure a participé, et qui est paru l'année de sa mort (1986), la recherche opérationnelle devient plus largement « l'application de la méthode scientifique à la préparation des décisions économiques et d'organisation », [Alj, A. et Faure, R., 1986], p. 7. La préface d'où est extraite cette dernière définition est d'ailleurs une attaque en règle aussi bien de la micro-économie spéculative que de l'économétrie théorique au profit de la recherche opérationnelle alors décrite comme un « art » à visées « concrètes » et de nature « essentiellement pluridisciplinaire », [Alj, A. et Faure, R., 1986], p. 9 .

[1] Le terme est employé par [Faure, R., Boss, J.-P. et Le Garff, A., 1961, 1967], p. 15.

[2] Voir les exemples donnés dans [Girault, M., 1959], p. 39, [Faure, R., Boss, J.-P. et Le Garff, A., 1961, 1967], pp. 53-64 et le premier essai de classification des différents objets d'étude pour la recherche opérationnelle dans [Mc Closkey, J. F. et Trefethen, F. N., 1954, 1957], p. 22.

concurrence avec elles pour cela. Le type de service lui-même n'a pas besoin d'être spécifié. Aussi Maurice Girault, professeur à l'Institut de Statistiques, avait-il précisé de son côté que « tous ces cas se ramènent au schéma mathématique suivant : des mobiles M arrivent d'une manière aléatoire à un poste où ils doivent subir chacun une certain opération ou 'service', après quoi ils s'éloignent ou disparaissent du système »[1]. Le seul véritable transfert de « concept » que l'on peut repérer ici tient au fait que l'insecte peut être considéré comme une entité individuelle présentant effectivement les caractéristiques universelles que nous avons explicitées.

Il ne s'agit donc pas réellement d'un transfert de concept qui impliquerait par exemple une « réduction » du vivant au technique ou au mécanique ni non plus d'une « promotion » de l'insecte à l'humain, puisque, dans le formalisme des files d'attentes, les motivations des clients sont justement mises de côté dès le départ pour ne plus mettre en avant que les phénomènes temporels. Sinon, il ne serait pas possible de traiter de la même manière, de façon conjointe et dans un même modèle les mouvements des artefacts ou des objets en général, et les mouvements des hommes, ce qui était pourtant l'objectif originel et principal de ces méthodes, notamment pendant la seconde guerre mondiale. C'est bien en effet d'une entreprise rationnelle d'homogénéisation des acteurs humains et des choses dont la recherche opérationnelle témoigne, dès ses débuts. À travers ses concepts et en vue d'une modélisation unifiée, les phénomènes humains de conscience (les motivations par exemple), aussi bien que les raisons fonctionnelles (physiologiques) propres aux phénomènes biologiques, y sont d'abord nivelés. Appliquer les concepts de la théorie des files d'attente au comportement des insectes ne constitue donc pas véritablement un déplacement du champ d'étude. On choisit ce faisant de faire abstraction de la raison ou de la cause physiologique qui incite tel type d'insecte précis à avoir tel type précis de comportement. C'est, si l'on veut, une forme de béhaviorisme appliqué à l'insecte. Toujours est-il qu'un tel transfert de la recherche opérationnelle à la modélisation du comportement des insectes n'a pas semblé exiger une réelle justification aux yeux de de Reffye puisqu'il le considère comme évident. De notre point de vue, cette absence de justification indique bien que de Reffye, sur ce point précis, fait pleinement et naturellement fond sur les attendus de son époque au sujet de la méthode des modèles isomorphes telle qu'elle est largement préconisée depuis l'avènement de la cybernétique (en particulier dans les sciences du *comportement* où seuls des actions simples et des flux interviennent[2]).

Relativité des échelles et rôle de la modélisation

Cependant, au début de son article, de Reffye ne rappelle pas d'emblée l'esprit de la méthode particulière qu'il a pourtant déjà en vue. Exposant d'abord les résultats empiriques qui ont été appelés par la première des cinq questions du « cahier des charges », il exprime un soupçon au regard de ce que ces premiers résultats globaux pourraient nous faire immédiatement conclure. C'est là seulement qu'il justifie à proprement parler l'introduction de la « théorie des files d'attente » :

« On peut donc conclure que dans la première station, ce sont les Cécidomies et que dans la deuxième station, ce sont les Thrips qui assurent la majeure partie de la pollinisation des cacaoyers, si l'on se base uniquement sur le critère du nombre d'insectes par fleur. Nous verrons

[1] [Girault, M., 1959], p. 39.
[2] Pour les sciences de la forme, comme on commence à le comprendre, le formalisme cybernétique (boucles de rétro-contrôles, formalisation des flux en cycles ou ouverts…) se révèle en revanche moins directement pertinent.

qu'il y a lieu de modifier cette première appréciation d'après le point de vue de la théorie des files d'attente. »[1]

Dans ce cas-là, avec l'emploi de la notion de « point de vue », il apparaît clairement que l'introduction d'un formalisme mathématique est censé « redresser » l'image que l'on avait du phénomène à partir des seules mesures directes accessibles. Or, comme dans les travaux antérieurs de de Reffye, ce redressement n'est pas tant un traitement de données ou un traitement aveugle de l'information qu'un véritable travail d'hypothèse et de calibrage de modèles explicatifs des micro-événements impliqués. Il va s'agir d'interpréter ce que l'on mesure non plus comme des données élémentaires, mais au contraire comme des données macro-événementielles résultant elle-même de l'interaction des micro-événements supposer exister au niveau des destins individuels des insectes. Notons ici que, dans ce cas de figure, la supposition de l'existence d'un tel niveau n'est pas choquante : elle est directement suggérée par l'expérience sensible immédiate et quotidienne : par une observation, on *voit* des insectes arriver sur les fleurs et en partir. On *sait* d'autre part qu'ils n'y vivent pas, qu'ils n'y font que passer, etc. On ne peut dire qu'il s'agisse d'une hypothèse théorique ni même d'un modèle spéculatif, mais plutôt d'un modèle intuitif. Ce qui est copié est donc ici ce qui est facilement reconnaissable.

Toutefois il s'agit d'un retour *a priori* étrange sur les hypothèses des modélisations antérieures mais qui peut se comprendre si l'on prend conscience du fait suivant : dans l'article de 1977, le niveau micro-événementiel était originellement la distribution des « passages efficaces » d'insectes pollinisateurs quelconques en fonction du nombre de grains de pollen. Ce niveau devenait trop inutilement microscopique pour l'article de 1978 qui se concentrait alors davantage sur l'aval du processus : la fructification et donc le rendement en fèves. La considération de la résultante de cette distribution (la distribution totale de grains de pollen par style) suffisait donc amplement et c'était elle qui jouait alors le rôle de micro-événement au regard du macro-événement résultant : la courbe de rendement. Les insectes et leurs diversités pouvaient être oubliés sans dommage grâce à une certaine myopie de la modélisation due elle-même à la distance ou à la profondeur trop grande de l'intervention de ces facteurs dans la résultante qui intéressait alors. Mais, dans l'article de 1980, il se passe quelque chose de directement symétrique. Alors que les chercheurs se penchent à nouveau sur l'amont du processus, ils considèrent le micro-événementiel de 1977 comme macro-événementiel, c'est-à-dire comme mettant en œuvre et nous masquant l'action de facteurs mal connus encore à découvrir : c'est la distribution des « passages efficaces » qui devient le phénomène macroscopique à expliquer et à analyser par des micro-événements. Si bien que se confirme encore une fois l'idée que, dans une modélisation de ce type, l'échelle des phénomènes n'est *pas définie en soi* mais qu'elle dépend premièrement de ce qui est directement connaissable et mesurable, deuxièmement de la question que l'on se pose à son sujet, et, troisièmement, de la prise tant empirique que théorique que l'on peut ou que l'on imagine pouvoir avoir sur les facteurs (encore mal connus) qui sont supposés contribuer à ce qui est globalement mesurable. Le dogme perspectiviste, maintes fois invoqué par ailleurs dans l'école de modélisation française, selon lequel la nature du modèle dépend avant tout de son objectif pragmatique est certes encore présent, dans cette épistémologie du modèle à visée de réplication. Mais il est relégué au second plan.

[1] [Reffye (de), Ph., Parvais, J.-P., Coulibaly, N. et Gervais, A., 1980], p. 85.

Le « rappel » et l'« application » de la théorie des files d'attente

C'est donc, comme nous l'avons vu, après avoir émis un doute sévère sur la fiabilité de l'enseignement immédiat des seules données quantifiées accessibles sur la présence des insectes dans les fleurs, que de Reffye procède à ce qu'il nomme un rappel de la théorie des files d'attentes. Pour ce faire, il s'en tient aux quelques hypothèses élémentaires (voir encadré) sans aucunement rappeler les démonstrations ni même justifier leurs hypothèses (comme celle de l'existence d'un régime permanent dans un processus aléatoire de type poissonien). Il a en effet dans l'esprit d'« appliquer »[1] ensuite directement ce « point de vue » à son problème sans assumer toutes les démonstrations qui ont servi à constituer cet outil formel. Il est cependant surprenant que ni lui-même ni les auteurs qui ont collaboré avec lui à ce travail ne songent à inscrire ces propositions de modélisation dans une filiation comme celle de la dynamique des populations qui fait explicitement usage des processus de Galton-Watson[2] (1874) depuis leur reprise par R. A. Fisher en 1922 et des processus de naissance et de mort depuis 1924 avec les premiers travaux de G. U. Yule[3].

Rappel de la théorie des files d'attente[4]

« En recherche opérationnelle, on entend par file d'attente les processus de stationnement de clients qui arrivent à une station qui les traite avec un certain débit par unité de temps :

On distingue :

1° La loi d'arrivée des clients ;

2° La loi de service (nombre de clients traités par unité de temps) ;

3° La file d'attente qui résulte mathématiquement de ces deux lois (nombre de clients qui font la queue)

Classiquement, dans le cas où seul le hasard joue, on adopte des processus poissoniens.

Si λ est le nombre d'arrivées par unité de temps, le nombre de clients N arrivant dans un intervalle de temps t suit la loi de Poisson :

$$P_{(N)} = \frac{e^{-\lambda t}(\lambda t)^{(N)}}{N!}$$

[1] C'est le terme qu'il emploie dans le titre de la section suivante : « application au trafic des insectes », [Reffye (de), Ph., Parvais, J.-P., Coulibaly, N. et Gervais, A., 1980], p. 86.

[2] Les processus de Galton-Watson sont des processus aléatoires qui représentent la loi de succession aléatoire dans le temps de la taille d'une population d'un seul type donné (par exemple portant un nom propre identique : cela sert au suivi des noms de famille en Angleterre). Les processus de G. U. Yule diffèrent en ce sens qu'ils considèrent différents types de filiations possibles pour une génération. Car la question qui intéresse Yule est celle de l'apparition des espèces par mutation au fil des générations. Il s'agit donc d'une première forme de ce que l'on appellera par la suite processus de ramification. Après 1945, P. H. Leslie prolongera ces distinctions en les employant pour formaliser l'évolution des différentes catégories d'âges possédant chacune une viabilité et une fécondité différentes.

[3] Voir [Harris, T. E., 1963, 1969], pp. 1-3 et 125-127.

[4] Nous reprenons ici directement à l'article de 1980 son texte de présentation rapide. Voir [Reffye (de), Ph., Parvais, J.-P., Coulibaly, N. et Gervais, A., 1980], p. 86. Ce texte est lui-même très inspiré de la présentation habituelle qu'en fait Robert Faure. Les notations sont exactement les mêmes. Voir par exemple [Faure, R., Boss, J.-P. et Le Garff, A., 1961, 1967], pp. 54-59.

Si μ est le nombre de clients traités par unité de temps, la durée du service pour un individu suit la loi exponentielle de densité :

$$f(t) = \mu\, e^{-\mu t}$$

Les équations de processus de naissance et de mort[1] *établissent la probabilité d'avoir N clients dans la file. »*

Il peut y avoir deux réponses à cette question. D'une part, les biologistes, les généticiens et les entomologistes qui entouraient alors de Reffye, au vu de leurs formations et de leurs centres d'intérêt antérieurs, n'étaient pas eux-mêmes très versés dans la modélisation mathématique issue de la dynamique des populations. L'entomologiste N. Coulibaly comme le biologiste cellulaire J.-P. Parvais ont plutôt suivi et accompli une formation de physiologistes. Ils regardent donc les phénomènes vivants d'interaction entre insectes et fleurs au mieux du point de vue de l'écophysiologie, mais pas du tout avec le regard de l'écologie ni de la dynamique des populations où primeraient pourtant les notions de prédateurs et de proie ainsi qu'elles furent introduites formellement dans les premiers modèles de Lotka et Volterrra. De Reffye lui-même avait été formé à l'amélioration des rendements et des plantes dans une perspective principalement physiologique ou de biologie cellulaire pour la sélection génétique. D'autre part, il faut reconnaître que l'objet étudié ici n'est pas formellement tout à fait identique à des processus de naissance, de mort ou de prédation tels qu'ils étaient encore majoritairement traités en France dans les années 1970 : c'est-à-dire avec le souci d'en venir le plus vite possible à une expression analytique (différentielle ou autre), au besoin difficilement soluble, des phénomènes considérés à un niveau agrégé. Les approches de l'écologie des populations elles-mêmes ne se focalisaient pas tant en effet sur la rencontre individuelle, sur le destin individuel du prédateur ou de sa proie, que sur la mise en place d'équilibres globaux au niveau de l'écosystème.

De son côté, la recherche opérationnelle, parce qu'elle s'est conçue davantage comme un art pluridisciplinaire, comme une science appliquée ou une science d'ingénieur, que comme une science pure, a en revanche développé moins d'énergie que l'écologie théorique ou même la biométrie à systématiquement rechercher des expressions analytiques pour ses modèles. Même si ses promoteurs affirment parfois l'importance des modèles analytiques[2], la mise à disposition des calculateurs numériques dès les années 1950 dans ce secteur, et l'urgence de disposer de conseils effectivement opérationnels pour la décision économique et de gestion ont contribué à lui faire mettre au second plan cet objectif. De plus, de nombreux sectateurs de cette discipline ont œuvré à sa vulgarisation par la publication et la traduction d'ouvrages pédagogiques élémentaires et de référence, notamment, en France, aux éditions Dunod, dans la collection « Recherche

[1] Voici en substance la méthode à laquelle de Reffye fait allusion ici, mais qu'il ne justifie aucunement. En considérant que le processus de Poisson est un processus de naissance et de mort (naissance = arrivée d'un client ; durée de vie = durée de stationnement), et en se plaçant en régime permanent (une fois qu'on a montré qu'il existe !), on peut résoudre un système d'équations en prenant pour chaque équation deux instants voisins (donc successifs). Ce sont alors seulement les changements entre états immédiatement voisins qui interviennent entre ces deux instants : le passage du nombre N de clients dans la queue soit à N, soit à N-1, soit à N+1 clients. Les équations du système combinent donc chacune, et pas à pas, les probabilités de transition combinées et exprimables explicitement. Par récurrence, on peut ensuite résoudre ce système et exprimer la loi de probabilité du nombre de clients dans la queue à tout instant. Pour le détail de cette technique de combinaison « pas à pas » des lois de probabilités du processus, voir [Girault, M., 1959], pp. 35-36 et 41-42.

[2] « Bien que les méthodes de simulation gagnent du terrain, en raison de la facilité qu'on a de fabriquer très rapidement les échantillons artificiels à l'aide des calculateurs électroniques aptes à tirer des nombres au hasard, et grâce aux possibilités de mise en œuvre des modèles comptables sur ces mêmes calculateurs, les analystes de la recherche opérationnelle cherchent, avant tout, des modèles analytiques des phénomènes économiques », [Faure, R., Boss, J.-P. et Le Garff, A., 1961, 1967], p. 15.

opérationnelle » dirigée par Georges Darmois. Ce n'est donc pas un hasard que de Reffye ait davantage appris à maîtriser la manipulation des processus aléatoires avec cette discipline, pourtant davantage tournée vers l'économie et les sciences humaines en général, qu'avec la biométrie.

Dans la suite de l'article, de Reffye adapte le modèle général de processus poissonien au problème spécifique qui est le sien en faisant une hypothèse supplémentaire. En effet, on ne peut pas réellement considérer que les insectes fassent la queue dans une fleur. Mais ils se répartissent dans la fleur sans trop se gêner *a priori*. Ce qui peut mathématiquement s'exprimer de la façon suivante dès lors que l'on dispose du modèle poissonien : « Le taux de service est proportionnel au nombre N de clients dans la station. »[1]

Dès lors, la probabilité de trouver N insectes dans la fleur à un instant donné est exprimable explicitement en fonction du nombre λ d'insectes arrivants et du nombre μ d'insectes disposant du service à ce moment-là :

$$P_{(N)} = \frac{e^{-\frac{\lambda}{\mu}} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^{(N)}}{N!}$$

De Reffye reconnaît alors cette loi calculée analytiquement comme l'expression d'une loi de Poisson de paramètre $\frac{\lambda}{\mu}$. On peut cependant considérer que μ, le taux de service par unité de temps, dépend en fait du nombre N de clients dans la fleur. Donc :

$$P_{(N)} = \frac{P_0 \lambda^N}{N! \mu_1 \mu_2 \ldots \mu_N} \qquad \text{où} \qquad P_0 = e^{\frac{-\lambda}{\mu}}$$

En secouant les fleurs, ce qui a pour effet de la vider de ses occupants, en répertoriant et en dénombrant ensuite les nouveaux insectes arrivés sur elle au bout d'une minute, il est possible d'évaluer pour chaque espèce d'insecte le taux d'arrivée λ intervenant dans la loi d'arrivée horaire et qui s'exprime en nombres d'insectes par fleur et par heure. En répertoriant tous les insectes observés à un moment donné sur un grand nombre de fleurs (8020 fleurs à Bingerville, par exemple), il est également possible d'évaluer la distribution des files d'attentes, c'est-à-dire le nombre de fois où l'on a trouvé une fleur avec 0, avec 1, avec 2, …, avec N insectes. On peut alors calculer empiriquement la loi d'arrivée P(N). Comme on dispose par ailleurs de sa formulation explicite (la formule précédente) en fonction des μ_N, on peut donc reconstituer le débit μ_N des insectes passant au « service », avec N insectes par heure, ainsi que le temps t_N moyen de stationnement de chacun des N insectes ($t_N = 1/\mu_N$).

L'organigramme du programme synthétique de simulation de la pollinisation

À la fin de l'article vient le moment de la synthèse de tous les sous-modèles au moyen du programme de simulation. Le matériel employé est toujours le même que précédemment. Il s'agit

[1] [Reffye (de), Ph., Parvais, J.-P., Coulibaly, N. et Gervais, A., 1980], p. 86.

du HP 9825. Il n'y aura aucun dessin bien sûr mais seulement des courbes de distribution. Le cœur du programme se concentre sur le destin d'une fleur et réitère ensuite cette chronique aléatoire sur un grand nombre de fleurs. Par ce texte qui se trouve aux côtés de l'organigramme, de Reffye résume alors ce que l'organigramme indique :

« On peut procéder à une simulation de la pollinisation selon la méthode de Monte-Carlo.

Dans un premier temps, on tire au hasard une fleur du matin, de la veille ou de l'avant-veille (en proportion).

Dans un deuxième temps, on procède à la génération du nombre d'insectes passant sur la fleur, selon la loi de Poisson des arrivées, qui est fonction de l'âge de la fleur.

Dans un troisième temps, on procède à un chargement de grains de pollen sur les insectes, tiré au hasard de la distribution du nombre de grains de pollen par insecte.

Enfin, dans un quatrième temps, on dépose ce pollen sur le style avec une loi de probabilité, fonction du nombre de grains. L'organigramme suivant montre les opérations logiques à effectuer. »[1]

Le style de ce passage est suffisamment remarquable pour que nous nous y arrêtions un peu. Il est assez révélateur de l'interprétation que de Reffye et ses collègues ont d'un programme de simulation global. D'une part, avec l'emploi du pronom personnel « on » et des verbes d'action qui l'accompagnent, se manifeste une volonté constante d'identification entre le travail du calculateur et ce que devrait faire d'équivalent un opérateur humain. Le programme de simulation est donc pensé à l'image d'une série de tâches successives assimilables à des tâches que pourraient accomplir un homme.

On a là une trace de cet anthropomorphisme méthodologique auquel nous invite souvent la confection de modèles, y compris les modèles sur ordinateur. Car on rejoint l'idée que l'on ne conçoit bien que ce que l'on se voit soi-même faire par participation imaginative[2]. Dès lors que de Reffye a cette fois renoncé à nous donner la liste intégrale du programme, les instructions élémentaires en HPL sont en effet métaphorisées et transformées en actions élémentaires pour être mieux explicitées.

En même temps, ce passage rédigé nous représente bien un phénomène naturel (la pollinisation par des insectes) dans sa temporalité, dans son histoire manifeste, puisqu'on y insiste beaucoup sur la scansion des étapes successives : « premier temps », « deuxième temps », etc. L'organigramme final témoigne donc d'une logique temporelle qui encadre et enchaîne des micro-événements eux-mêmes mathématisables. C'est à ce titre que l'organigramme, comme le programme, passe également pour un bilan, voire pour une récapitulation intégrale et raisonnée de l'article lui-même et de ses analyses successives. Mais où sont les résultats ?

---

[1] [Reffye (de), Ph., Parvais, J.-P., Coulibaly, N. et Gervais, A., 1980], p. 94. Sur le côté droit de ce texte figure en effet l'organigramme simplifié.

[2] Selon le principe proposé par Thomas Hobbes et repris notamment par Gianbattista Vico. Le philosophe Jean-Pierre Dupuy le formule ainsi : « Nous ne pouvons connaître rationnellement que ce dont nous sommes la cause, que ce que nous avons fabriqué », [Dupuy, J.-P., 1994, 1999], pp. 16-17. Dans notre cas, il s'agit de faire un modèle (ici, tout le programme) qui *fait* comme on *pourrait faire* si on avait temps et la possibilité d'imiter la nature comme lui. Mais cette classique transitivité du comprendre par le faire, *via* le médiateur qu'est supposé être le modèle, est là aussi battue en brèche, selon nous, par le modèle de simulation fractionnée. Car on ne peut plus simuler, refaire tout uniment, en son esprit le fonctionnement intégral du programme : on ne peut faire ce qu'il fait, dès lors qu'il n'y a plus de récurrence mais, au mieux, de la récursivité fractionnée et distribuée. On peut simplement comprendre *séparément* le *genre* de choses qu'il fait : les sous-routines, les sous-modèles. Mais refait-on en son esprit la *recombinaison* logico-mathématique pas à pas ? *Comprend*-on cette recombinaison ? À connaître le modèle de simulation dans ses règles, dans sa liste et dans son organigramme, y gagne-t-on pour autant une compréhension, même approchée, de ce qu'il *fait* ?

Des résultats en demi-teinte

Qu'est-ce qui est finalement simulé à l'issue de ce programme ? Rien d'autre qu'un échantillon de fleurs plus ou moins pollinisées et dont on peut vérifier qu'il correspond aux distributions empiriques. Il s'agit donc de la « reconstitution d'un échantillon de fleurs » comme l'indique la dernière case de l'organigramme. En fait, la discussion et la conclusion de cet article de 1980 s'étendent bien davantage sur ce que les auteurs ont appris *lors* de la constitution des sous-modèles que sur ce que la combinaison finale de ces sous-modèles leur aurait enseigné. Au contraire du modèle de croissance du caféier de 1976 par exemple, la simulation n'est donc pas présentée ici comme une source directe d'informations. Les auteurs reviennent beaucoup plus sur les limites de cette approche par modélisation fragmentée qui leur a par exemple imposé de faire beaucoup d'hypothèses d'approximation, même et surtout au niveau des micro-événements. De plus, les conclusions les plus importantes, et qui sont d'ordre biologique ou agronomique, ne sont pas tirées des résultats globaux de la simulation. Ils sont certes importants mais ils ont été glanés çà et là lors du calibrage de tel ou tel sous-modèle. Par exemple, on y a appris que la pollinisation croisée est plus intense à Bingerville qu'à Divo parce que les insectes de Bingerville restent moins longtemps mais passent plus souvent dans les fleurs. Ce qui peut donc expliquer la pollinisation médiocre qui caractérise la cacaoyère de Divo[1]. Or ce résultat était connaissable dès la seconde étape de l'analyse avant toute synthèse simulante.

La synthèse logico-mathématique que figure la simulation, sans être dépourvue de toute fonction argumentative, n'est donc là au mieux que pour confirmer *a posteriori* la pertinence des analyses ponctuelles et micro-événementielles. Certes, avec les sous-modèles introduits, il est possible de prévoir avec précision la répartition du pollen sur les styles. Ce qui, là aussi, est un gain en connaissance tout à fait considérable, il est vrai. Mais, au vu des expressions mathématiques finalement disponibles, ce calcul est faisable analytiquement sans recourir à la simulation. Si bien que la conclusion de cet article est très courte[2]. Les auteurs insistent finalement surtout sur la méthode d'analyse qui peut s'appliquer dans différents contextes de pollinisation et aider à en caractériser quantitativement les facteurs–clés. Une seule phrase évoque la simulation pourtant très lourde qui en est issue : « La méthode permet de restituer par simulation la pollinisation naturelle. »[3] La simulation, en ce domaine, a prouvé qu'elle n'était peut-être pas l'approche nécessaire ni la plus directe.

Une « équation mathématique » supplante la simulation : un aboutissement aux yeux des agronomes

Le dernier article[4] que de Reffye co-signera en 1981 sur la question est d'ailleurs très révélateur de la façon dont les agronomes de l'IFCC se sont ensuite appropriés la particularité de ces travaux de modélisation du cacaoyer, cela au moment même où de Reffye soutenait sa thèse et préparait son retour en métropole (1979-1980). Cet article témoigne en effet clairement d'une ré-inflexion de la simulation vers une approche par modèle mathématique d'un seul tenant. Ce

[1] [Reffye (de), Ph., Parvais, J.-P., Coulibaly, N. et Gervais, A., 1980], p. 95.
[2] [Reffye (de), Ph., Parvais, J.-P., Coulibaly, N. et Gervais, A., 1980], p. 97. Elle fait quinze lignes. À comparer avec les trois pages de la « discussion » qui la précède.
[3] [Reffye (de), Ph., Parvais, J.-P., Coulibaly, N. et Gervais, A., 1980], p. 97.
[4] [Mossu, G., Paulin, D. et Reffye (de), Ph., 1981].

sont principalement les collègues de de Reffye, les agronomes restés en poste en Côte-d'Ivoire, qui ont fait subir cette inflexion à l'approche initiale par modèles fractionnés. Nous nommons cela une « ré-inflexion » puisqu'il s'agit pour les premiers signataires de ce travail (G. Mossu et D. Paulin)[1] d'utiliser les paramètres clés qu'avait pu mettre au jour l'approche par modèles fractionnés et simulation pour retourner vers une modélisation mathématique de type plus classique : la modélisation globale par une simple équation mathématique close. En fait, cet article ne présente pas de sous-modèles supplémentaires. Cela se comprend aisément. Il s'agit d'une simple application des acquis formels de 1978 et 1980 à une question moins fine que les précédentes et moins tournée vers la recherche des micro-événements ou de leurs paramètres de contrôle : celle de la prévision du rendement donc de la production en cabosses et en fèves. L'objectif n'est plus de déceler les paramètres fins qui sont à l'origine de la sous-pollinisation mais de calculer globalement l'espérance mathématique de la production en fèves ou graines.

Les auteurs considèrent comme acquises les analyses de l'article antérieur sur la pollinisation. Il leur manque simplement une quantification de l'événement initial précédent la pollinisation et la fructification : la floraison. Ils se proposent donc de procéder à une estimation du nombre moyen de fleurs par arbre à partir du nombre de fleurs tombées chaque matin sur une surface de toile de $1m^2$. La moyenne de ce phénomène leur suffit. Ensuite, les paramètres, notamment l'exposant 'a' de la loi de Pareto, appelé « indice de rareté du pollen », ou le point de flétrissement[2] différentiel des chérelles du cacaoyer décelable sur la courbe empirique du nombre de graines par cabosse, deviennent des « données expérimentales ». En fait les auteurs les acquièrent toujours indirectement en se servant des sous-modèles partiels de de Reffye. Cependant, pour ce faire, ils ne simulent pas ces sous-modèles au moyen du HP 9825 ; mais ils raisonnent sur leurs paramètres-clés et les bornes de leur validité pour en tirer une représentation quantifiée des processus moyens. Il n'est donc plus du tout question de « simulation ». Les auteurs se contentent de préciser d'ailleurs laconiquement :

« Les calculs numériques ont été réalisés à l'aide d'un calculateur Hewlett Packard HP 9825, muni d'un traceur de courbes HP 9862 A. »[3]

Le travail de de Reffye est donc interprété par ses collègues comme la mise à disposition d'un outil de calcul sophistiqué mais relativement homogène aux outils classiques. Par la suite, en considérant chacun des micro-événements que de Reffye avait distingués, plus précisément en raisonnant sur leurs résultantes ou sur leurs effets moyens, les auteurs arrivent à une succession d'évaluations empiriques des espérances mathématiques pour ces événements, alors même que certains calculs de moyenne à partir des formulations analytiques avaient en revanche trouvé leurs limites, comme nous l'avons vu précédemment. Avec ce procédé numérique, le processus global devient dès lors calculable sous la forme d'une combinaison multiplicative des contributions que l'on peut espérer pour chaque micro-événement. Les auteurs obtiennent au final ce qu'ils appellent significativement une « liaison mathématique entre les données expérimentales » ou « équation du rendement » :

---

[1] Exceptionnellement, de Reffye ne s'y présente que comme le troisième et dernier co-signataire. L'article paraît alors que de Reffye est déjà en métropole.

[2] Le point de flétrissement correspond au point où les ovaires ont un nombre insuffisant d'ovules fécondés pour que les fèves et la cabosse viennent à maturité. Si bien qu'en fait on trouve très rarement des cabosses pourvues de moins de treize à quinze graines. Voir [Reffye (de), Ph., Parvais, J.-P., Mossu, G. et Lucas, P., 1978], p. 258.

[3] [Mossu, G., Paulin, D. et Reffye (de), Ph., 1981], p. 157.

« Si Nt est le nombre de fleurs produites pendant le mois t et At l'indice de rareté du pollen simultané, le nombre de cabosses attendues à la maturation sera :

$$F(t + M) = K \,.\, Nt \,.\, \left(\frac{X_0}{X_w}\right)^{A_t}$$

C'est l'équation du rendement où X_0 est la borne initiale de la loi de Pareto, X_w le point de flétrissement différentiel du clone considéré et K un coefficient de pondération, qui englobe tous les facteurs dépressifs sur le rendement, supposés sinon constants du moins peu variables (dégâts d'insectes, de champignons, « wilt » physiologique[1], etc.). »[2]

Quand on a le nombre de cabosses arrivant à maturation, on n'a cependant pas encore le nombre de graines ou de fèves récoltées. Il faut ensuite que les auteurs évaluent le nombre moyen de graines par cabosse pour avoir la véritable équation du rendement. C'est là qu'ils utilisent la formulation analytique de la loi de Pareto mais d'une façon « empirique » pourrait-on dire. En effet, ils ne peuvent s'appuyer sur la formulation exacte de la moyenne car elle ne converge pas ou donne une valeur aberrante, comme nous l'avons vu. Ils s'appuient donc sur le fait que cette loi de Pareto de répartition du pollen n'est empiriquement valable pour la courbe résultante globale (le nombre de graines par cabosse) qu'entre le nombre minimal de graines par cabosse X_0 et le point où il y a une pollinisation suffisante et où c'est donc le nombre d'ovules par ovaires qui devient limitant. En ce qui la concerne, cette partie dans laquelle il y a une pollinisation suffisante ou saturante est modélisable par une loi binomiale. L'évaluation de son intégrale (ou fonction d'accumulation) ne présente pas de difficulté. Ils procèdent donc en quelque sorte à une intégration discrétisée et par morceaux de la loi de Pareto en supprimant la borne infinie qui posait le problème de la convergence pour le calcul exact de la moyenne. Les deux surfaces approximatives sont ensuite additionnées : elles représentent l'accumulation du nombre de graines récoltées. On peut alors sans peine trouver une « moyenne » à ce phénomène global reconstitué abstraitement (c'est-à-dire sans égard pour les divers scénarios particuliers qui y mènent) : en divisant cette somme d'intégrales par le nombre moyen de cabosses récoltées, on obtient le nombre moyen de graines récoltées par cabosse. Si on le multiplie par le nombre C de cabosses espérées pour l'arbre particulier qui nous occupe, au vu de sa floraison, on a la véritable évaluation de la production en graines de cet arbre quand il en sera venu à maturation dans M mois.

Les auteurs trouvent donc pour finir une « formule du rendement » unique qui est bien une formule mathématique close ne faisant intervenir que des multiplications, des additions et des exponentielles[3]. En comparant la récolte effectivement obtenue et mesurée avec celle prévue par la formule mathématique, les auteurs évaluent ensuite l'erreur d'estimation à plus ou moins 15% ; ce qu'ils jugent être suffisamment bas pour faire de cette équation un bon outil de prévision.

---

[1] Il s'agit d'un phénomène de nature physiologique au cours duquel l'arbre perd de jeunes fruits [Mossu, G., Paulin, D. et Reffye (de), Ph., 1981], p. 155.

[2] [Mossu, G., Paulin, D. et Reffye (de), Ph., 1981], p. 161. Ajoutons que M est la durée de maturation en mois. Elle vaut entre 4 et 5 mois (*ibid.*, p. 163).

[3] Nous ne la restituons pas ici car elle est assez longue. De plus, elle explicite la formulation algébrique de certains paramètres relativement secondaires et que nous n'avons qu'allusivement évoqués pour la commodité de notre propre exposé. Elle nous serait donc de peu d'utilité. On peut la retrouver dans [Mossu, G., Paulin, D. et Reffye (de), Ph., 1981], p. 166.

L'agronomie et les formules mathématiques fonctionnelles

À la fin de l'article de 1981, les auteurs principaux, G. Mossu et D. Paulin, insistent sur l'intérêt qu'il y a à disposer désormais d'un outil formel aisé à manipuler. Pour l'évaluation du rendement, objectif agronomique essentiel, ils ont procédé à un tri dans les formalismes que de Reffye avait proposés et rendus mutuellement compatibles grâce à son programme de simulation intégrale de 1978. Si l'on veut bien nous passer l'expression, ils ont en quelque sorte « désarticulé » cette représentation logico-mathématique mixte, et qui procédait fleur à fleur, pour lui faire parler à nouveau le langage de la moyenne, le langage mathématique de ces comportements moyens qui mènent de la fleur au fruit. Mais c'est éloigner de nouveau le modèle d'une représentation plus fidèle. Redevenant fonctionnel, le modèle redevient en même temps abstrait et non susceptible de validation pas à pas. Cependant leur modèle fonctionnel n'est pas dépourvu de validation acquise en cours de construction, même si, pour accréditer leur approche, les auteurs insistent plutôt sur la faible marge d'erreur finale par rapport à ce qui est mesuré en champ (15%), donc sur une validation de type *a posteriori*. Effectivement, dans ce cas particulier, le retour à la modélisation phénoménologique classique n'a pu être orchestré *que parce qu'un travail plus fin et plus « réaliste » de simulation avait précédé* celui-ci et avait auparavant validé pas à pas les sous-modèles ainsi que leurs paramètres respectifs (bornes inférieures et supérieures, exposant de Pareto, etc.). C'est bien la maîtrise quantitative doublée d'une compréhension biologique de ces divers paramètres, acquise auparavant par la simulation, qui a permis en retour que l'on se construise un modèle mathématique plus global. Car c'est à l'aide d'une nouvelle mise en scène interprétative et crédible de ces mêmes paramètres que la formule générale du rendement a pu être exprimée. Cette mise en scène est crédible parce que l'on peut la comprendre dans le détail et donc voir si l'on accepte les hypothèses simplificatrices les concernant. En ce sens, la simulation par modélisation fractionnée a permis à une nouvelle modélisation globale de se mettre en œuvre et de s'accréditer.

Quoi qu'il en soit, au vu des publications qui suivront dans la revue *Café, Cacao, Thé*, la pratique de la modélisation fractionnée, auparavant introduite et soutenue par de Reffye, ne sera pas véritablement relayée telle quelle à l'IFCC, après son départ pour la métropole. Et l'article que nous venons d'évoquer est en ce sens bien représentatif d'une ré-inflexion vers une modélisation mathématique plus classique car davantage tournée vers le fonctionnel, le phénoménologique global et le calculable. Dans cette perspective et de façon d'ailleurs significative, ce que de Reffye appelait depuis au moins 1980 un « micro-ordinateur »[1], ses collègues le considère encore en 1981 comme un « calculateur »[2] alors même qu'ils ont assidûment fréquenté cette machine en présence et avec l'aide de de Reffye. Cela peut toutefois se comprendre. À partir du moment où l'objectif que l'on a consiste à construire un modèle mathématique calculable sous la forme d'une équation simple, toute l'aide que l'on trouvera pertinente de demander à l'ordinateur sera essentiellement de type calculatoire : il s'agira de lui faire calculer ou de lui faire résoudre le modèle mathématique, un point c'est tout.

[1] [Reffye (de), Ph., Parvais, J.-P., Coulibaly, N., Gervais, A., 1980], p. 84.
[2] Voir *supra* le passage laconique déjà cité : [Mossu, G., Paulin, D. et Reffye (de), Ph., 1981], p. 157.

L'application du modèle du caféier à l'étude de l'influence des engrais (1977-1980)

Nous terminerons l'évocation des travaux que de Reffye a menés en parallèle de ceux de sa thèse avec une recherche qui a porté à nouveau sur le rendement du caféier. Nous verrons que là aussi nous aurons affaire à un travail d'application de certaines modélisations antérieures par ses collègues. De fait, certains autres enseignements pourront être tirés au sujet de l'interprétation de cette nouvelle approche par les agronomes de l'IFCC.

L'affirmation selon laquelle la modélisation mathématique fractionnée, même lorsqu'elle ne fait pas intervenir de processus stochastiques, accroît le pouvoir de discrimination entre diverses pratiques agronomiques va se confirmer entre-temps dans les travaux que J. Snoeck et de Reffye vont poursuivre en parallèle sur le caféier. En effet, si le premier modèle « économétrique » de rendement du caféier, qui était fondé sur la recherche d'un optimum de production, est vite abandonné, il n'en est pas de même du modèle mathématique certain publié en 1976. Il se confirme bien que ce dernier donne une prise opérationnelle réelle sur les phénomènes qu'il représente. Alors même que de Reffye va plus particulièrement travailler de son côté à affiner et à modifier (dans d'autres directions, comme nous le verrons) ce premier modèle de croissance en vue de sa thèse d'Etat, J. Snoeck va confirmer l'intérêt de ce genre de modélisation pour la compréhension précise du rôle des engrais azotés dans l'accroissement de la productivité du caféier. Ce travail est d'ailleurs présenté par Snoeck au 9ème « Colloque scientifique international sur le café » qui se tient à Londres en juin 1980. Et il est par la suite publié dans la revue *Café, Cacao, Thé* d'octobre-décembre 1980.

Il s'agit en fait d'une simple application du modèle de croissance de 1976. En tant que programme informatique et en tant qu'outil technologique fonctionnant effectivement, le modèle de 1976 va ainsi entrer dans un « cycle de vie » propre, relativement autonome par rapport à son concepteur initial alors même que ce dernier travaille déjà entre-temps à le rendre obsolète. Nous pouvons voir là un parallélisme clair entre la vie des modèles mathématiques de recherche et les trajectoires de vie des produits industriels. Cela est propre en fait à la vie de tous les logiciels[1]. Mais dans ce cas précis, le modèle réalisé dans le programme peut mener une vie relativement autonome dans la mesure où les questions auxquelles il permet de répondre sont en fait assez ouvertes, même si la problématique scientifique pour laquelle il a été expressément conçu a d'abord été plus limitée.

Pour sa part, le problème que se pose J. Snoeck n'est pas de savoir si le rendement de ses arbres est amélioré par le recours à des engrais azotés. Cela est manifestement le cas : il suffit de compter le nombre de kilogrammes de café marchand obtenus par hectare avec et sans traitement, et de comparer. Le problème est plutôt celui de reconnaître exactement *où* les engrais exercent leur influence bénéfique sur la production en café. Il s'agit de déterminer lesquels parmi les différents facteurs du rendement sont directement et préférentiellement influencés par les engrais. Or, le modèle synthétique de de Reffye (que l'article présente cette fois explicitement comme le sien[2]) est supposé donner en même temps une lecture analytique précise et nouvelle

[1] La notion de « cycle de vie » est en effet explicitement et publiquement employée par la firme américaine Microsoft, par exemple, pour justifier les lancements gradués et calculés de ses divers logiciels de bureautique.

[2] Dans l'article de 1980 [Snoeck, J. et Reffye (de), Ph., 1980], même s'ils sont encore tous les deux cosignataires comme dans l'article de 1976, le modèle de 1976 est en fait explicitement et exclusivement attribué à Philippe de Reffye (voir *ibid.*, p. 259). Assez logiquement d'ailleurs, le premier cosignataire de l'article de 1976 était bien de Reffye tandis que celui de 1980 est Snoeck, façon d'exprimer lequel des deux a été à chaque fois le plus gros contributeur. Cela confirme la justesse de notre hypothèse selon laquelle, dans les publications de *Café, Cacao, Thé*, le premier signataire serait le contributeur principal.

des facteurs principaux présidant à la production en café : les nœuds fructifères. Pour confirmer cette idée, J. Snoeck a utilisé des mesures faites à partir de différents essais factoriels effectués sur le clone dit « 182 ». Or, comme il l'indique :

« Grâce à ces mesures, de Reffye a pu calculer les équations caractérisant l'architecture de ce clone et il suffit d'une série de mesures à un instant T donné pour pouvoir refaire le graphe permettant l'estimation du nombre de nœuds plagiotropes (totaux, feuillus et fructifères) que porte le caféier à l'instant T choisi. »[1]

Chaque essai d'engrais sur un certain nombre d'arbres peut donc donner lieu à des mesures moyennes représentatives du traitement qui y est fait. Ces mesures moyennes peuvent ensuite permettre l'ajustement des équations des deux sous-modèles de base servant au modèle logico-mathématique de 1976. Ces équations permettent ensuite d'exprimer le nombre de nœuds de chaque type (totaux, feuillus et fructifères) pour chaque traitement à chaque instant pour un arbre d'un âge T donné.

Ainsi, c'est dans les paramètres de ces équations que se distinguent les traitements. On y voit que l'engrais joue essentiellement sur le nombre de nœuds. Cela est montré plus clairement par l'« examen des courbes et des graphiques »[2] (du nombre de nœuds en fonction de l'âge de chaque étage) obtenus pour les différents traitements. L'effet bénéfique de l'engrais se porte principalement sur le nombre total de nœuds et, par contrecoup, sur le nombre de nœuds fructifères. Si l'on utilise la fonction de visualisation du programme de 1976, cette différence apparaît de façon plus réaliste encore sur les profils des arbres types dessinés par la table traçante. Le pouvoir discriminant du programme de simulation permet donc bien de produire des résultats dont la signification biologique est cruciale pour l'améliorateur agronome.

Dans le cas de cette recherche, nous voyons que J. Snoeck a conservé telle quelle l'approche conçue par de Reffye. Il n'a pas désarticulé le modèle fragmenté ni la simulation comme ce sera en revanche le cas, ainsi que nous l'avons vu, dans la poursuite des recherches sur le rendement du cacaoyer. C'est que J. Snoeck pose ici une question plus précise au caféier : à quel niveau biologique, voire botanique, les engrais exercent-ils leur influence physiologique ? En disposant d'une représentation fragmentée, il peut faire l'hypothèse biologique qu'un des micro-événements modélisés se révèlera plus réceptif que les autres à un ajout en nutriments. Et c'est bien ce qui se produit. L'hypothèse biologique se confirme d'après les résultats de calibrage du modèle fractionné de de Reffye sur les mesures en champ. L'information acquise ici n'est donc pas tellement de nature quantitative ni même principalement physiologique : elle est plutôt qualitative et morphologique, puisqu'elle décide *quel type* d'événement morphologique est concerné en priorité par l'ajout d'engrais et non principalement dans quelle quantité, dans quelle proportion, etc. Cela n'est rendu possible que parce que, dès le modèle d'architecture de 1976, le caféier avait été représenté géométriquement de façon déjà assez réaliste et détaillée. Snoeck n'a pas besoin du modèle plus complexe de la thèse de 1979 pour voir cette seule hypothèse s'avérer. Il choisit le modèle de simulation le plus simple (et déjà publié) pour développer son argumentation. Comme nous allons le voir néanmoins, c'est cette orientation vers une représentation plus fidèle du caféier que de Reffye a pour sa part suivi dans le cadre de son travail de thèse.

[1] [Snoeck, J. et Reffye (de), Ph., 1980], p. 259.
[2] [Snoeck, J. et Reffye (de), Ph., 1980], p. 263.

Bilan sur les prolongements des premières modélisations du caféier et du cacaoyer

Mais auparavant, dans ce dernier paragraphe, nous essaierons de répondre aux questions que nous nous posions au début de chapitre de manière à former un bilan. La première portait sur la réalité du caractère réellement opérationnel de ces modélisations fractionnées. La seconde évoquait la réception plus large qu'ont pu connaître ces travaux d'application, dans la communauté des agronomes, à la fin des années 1970.

Tout d'abord, nous avons pu constater que, tant pour les recherches menées sur le caféier que pour celles menées sur le cacaoyer, les collègues directs de de Reffye à l'IFCC ont immédiatement considéré qu'ils disposaient là d'un outil d'investigation et de sélection indéniablement efficace. Les travaux de J. Snoeck sur l'impact des engrais en témoignent. Toutefois, ils se sont appropriés les travaux de de Reffye d'une façon toute personnelle et sélective, notamment en ré-infléchissant leur usage vers l'utilisation plus classique (calculatoire) des modèles mathématiques fonctionnels propres à la biométrie de tradition française, en particulier depuis Georges Teissier et ses modèles allométriques. Il serait cependant tout aussi juste de dire que, dans le cas précis du cacaoyer auquel nous pensons, l'approche par modélisation fractionnée et par simulation prédisposait d'elle-même à cette interprétation minimale : comme nous l'avons vu avec les travaux de G. Mossu *et al.* (1981), elle a finalement contribué directement à démontrer sa propre inutilité pour l'évaluation des rendements. Encore fallait-il cependant en passer par la simulation pour pouvoir se payer le luxe de se priver d'elle en quelque sorte. Car cette abstraction *a posteriori* n'a pu se fonder que sur la claire prise de conscience des détails (les micro-événements) restitués et mis auparavant en scène dans la simulation. C'est à cette seule condition en effet que l'abstraction mathématique a pu procéder ensuite de façon réellement argumentée, en introduisant une formulation analytique globale qu'on aurait sans doute été bien en peine d'imaginer avant le travail de simulation.

Quant aux innovations conceptuelles auxquelles de Reffye s'est livré dans ces travaux d'application, du point de vue de la modélisation mathématique, la principale a consisté à poursuivre le « pillage » des méthodes de la recherche opérationnelle au profit de l'agronomie en insérant des sous-modèles à processus poissonien pour représenter la visite des insectes dans les fleurs. Cependant, même dans la simulation intégrale de la pollinisation de 1980, les processus poissoniens ne sont pas réellement simulés tels quels, car les insectes ne sont pas pris un à un dans leurs destins singuliers. Dans son programme en HPL, de Reffye considère en fait seulement la « loi d'arrivée » globale que génère un processus de type poissonien afin de pouvoir évaluer le nombre et le type d'insectes ayant visité une fleur pendant la durée de vie de cette fleur. Cela lui suffit. Il n'est donc pas besoin de recourir à une simulation aléatoire proprement dite comme celle qui intervenait en revanche dans le premier travail de 1977 sur la pollinisation[1]. Pourtant, comme nous le verrons par la suite, dans son deuxième modèle de croissance du caféier, dès 1977 (donc à peu près à la même époque), de Reffye donne précisément le beau rôle à cette approche par simulation aléatoire dans ses programmes. Nous aurons donc l'occasion de nous interroger sur ce choix pour l'aléatoire qui, apparemment, ne lui a pas toujours semblé nécessaire.

Pour ce qui concerne la réception hors de l'IFCC de ces premiers travaux de recherche, le constat que l'on peut en faire est plutôt mitigé voire négatif. Jusqu'en 1981, de Reffye a publié l'essentiel de ses articles dans la seule revue de l'IFCC : *Café, Cacao, Thé*. Or, elle est principalement à usage interne. Ses articles sont exclusivement en français. Son contenu est

[1] [Parvais, J.-P., Reffye (de), Ph. et Lucas, P., 1977].

certes relayé par les *Current Contents*. Mais, comme nous l'avons vu, en tant que revue officielle de l'IFCC, sa ligne éditoriale la voue quasi-exclusivement à la communication de solutions techniques ponctuelles sans que la recherche de solutions générales ni donc de formalismes nouveaux, que ce soit à destination de la biologie ou de l'agronomie, soit valorisée, au contraire. En conformité avec le statut et la mission propres à un organisme semi-public tel que l'IFCC, c'est une revue nationale essentiellement technique, qui a pour mission constante de faire le pont, de tisser des liens entre techniciens, agronomes, producteurs, torréfacteurs, industriels et économistes des branches considérées. À notre connaissance, pendant les années 1970 et à la suite de ses premières publications, de Reffye ne rencontrera d'ailleurs pas d'autres échos que ceux de ses collègues immédiats ou bien que ceux des professeurs ou chercheurs de métropole qu'il connaissait déjà (Yves Demarly, Sadi Essad).

À la décharge de de Reffye, il faut également savoir que, pour deux raisons principales, il n'était alors pas dans la tradition de l'IFCC d'inciter ses chercheurs à publier dans des revues scientifiques de rang international : tout d'abord parce qu'en tant qu'institut dédié à la recherche appliquée, cela n'avait pas grand sens d'encourager de telles publications dès lors que les objectifs de recherche semblaient *a priori* différents de ceux de la recherche fondamentale ; ensuite, parce qu'en tant qu'institution semi-privée, donc directement liée à la valorisation économique de productions agronomiques, l'IFCC ne cherchait pas systématiquement à donner une information qui aurait pu profiter à ses concurrents[1].

Ainsi, autant de Reffye a-t-il pu bénéficier de la grande autonomie que lui laissaient ses collègues, tout au moins à ses débuts, autant a-t-il pu également bénéficier du soutien de J. Snoeck puis de J. Capot ainsi que des possibilités financières de son institution (notamment avec l'achat du HP 9825), autant a-t-il dû néanmoins payer en retour cette indéniable liberté par un assez fort isolement à l'égard de la communauté des agronomes et des chercheurs en arboriculture et foresterie de métropole ou d'ailleurs. Les colloques internationaux auxquels l'IFCC lui a permis de participer étaient eux-mêmes essentiellement axés sur les diverses techniques d'amélioration des traitements du café ou bien du cacao, sans qu'il y ait de possibilités, par exemple, d'y présenter et d'y concevoir publiquement une modélisation de la plante en général, c'est-à-dire dans ses caractères génériques et indépendamment de questions immédiatement utilitaires pour le sélectionneur.

Certes, c'est bien la précision et l'urgence de ces questions à visée pragmatique qui ont fait que de Reffye a d'abord eu une approche de type ingénieur, au contraire de Hisao Honda par exemple. Mais l'idée qu'il se faisait par ailleurs de la science expérimentale et du rôle que devaient y jouer les formalismes l'a néanmoins incité à avoir également une approche très en amont de la sélection variétale brutale (sélection qui se ferait au vu des seules performances globales). Il a donc été poussé à produire, à l'occasion de problèmes au départ très ciblés, des solutions de modélisation qui dépassaient de fait le cas par cas.

Comme nous allons le voir, c'est surtout à l'occasion de son travail de thèse, puis en discutant avec des botanistes plus aguerris, que de Reffye va réellement prendre conscience du potentiel que recèle son approche pour une science biologique que l'on pourra alors juger plus fondamentale, parce que plus universaliste, principalement en ce qui concerne la représentation des plantes et de leur dynamique de croissance.

[1] Cette précision nous vient de notre entretien avec Hervé Bichat [Bichat, H. et Varenne, F., 2001], p. 11.

CHAPITRE 26 - Le « modèle architectural » en botanique : Francis Hallé et Roelof A. A. Oldeman (1970-1978)

Au cours des années 1977 et 1978, pendant les recherches que nous avons évoquées précédemment, de Reffye projette en effet de poursuivre ses propres travaux de modélisation du caféier et d'en faire le matériau pour une thèse d'Etat. Au vu de ses premières réussites dans la recherche appliquée, même si sa situation en Côte-d'Ivoire fait qu'il se trouve très peu encadré d'un point de vue universitaire, il se voit à nouveau fortement encouragé dans l'idée d'accéder au titre de docteur d'Etat afin de postuler peut-être à terme à un poste de chercheur en métropole, à l'INRA par exemple. À ce moment-là, cet objectif ne lui paraît pas irréaliste. Il lui faut cependant un sujet de thèse. Malgré les contacts étroits qu'il a conservés avec Yves Demarly, le directeur de sa thèse de 3ème cycle, et au vu du caractère déjà très « appliqué » de ses premiers travaux, ce sujet ne peut pas venir directement d'une suggestion purement universitaire. Il naîtra donc tout naturellement des premiers modèles qu'il avait opportunément conçus et mis en œuvre sur place, à l'IFCC. Mais il lui faut pour cela une direction inédite, une question nouvelle susceptible d'inciter à de nouveaux développements. Il faut également que cette piste de recherche soit à même de faire que le chercheur atteigne à des considérations plus générales d'un point de vue biologique, moins directement pragmatiques, concernant le caféier puisqu'il ne s'agit plus de produire une simple thèse de 3ème cycle.

Une motivation nouvelle pour la thèse d'Etat : le réalisme botanique

Cette question nouvelle qui sera à même de légitimer ces travaux de thèse lui vient en fait à la suite d'une insatisfaction qu'il ressent rapidement face à son modèle de croissance cinétique et déterministe de 1976, alors même que ce dernier répond déjà à plusieurs des attentes de ses collègues comme de son chef direct, J. Snoeck. Dans les caféiers réels en effet, on observe une assez forte irrégularité, plus précisément une variabilité dans les durées de vie des nœuds, quel que soit leur type. C'est même une des plantes qui se trouve manifester le mieux ce genre d'irrégularité. D'où la suggestion de prendre en considération cette variabilité pour faire produire à l'ordinateur une représentation plus fidèle architecturalement aux cas individuels réels rencontrés en champ. De Reffye n'oublie pas que, même s'il a simulé leur croissance de façon chronologique (donc de façon réaliste dans cette dimension temporelle), il n'a considéré en fait que les durées de vie moyennes des événements affectant tour à tour les nœuds de l'arbre. Il se trouve que, par chance, cette première approche par la moyenne suffisait et convenait quand même très bien dans le cas étudié parce que, eu égard à la stabilité du climat subtropical de la Côte-d'Ivoire, le caféier ivoirien manifeste globalement une grande continuité dans sa croissance[1], malgré sa forte tendance à la dispersion autour des moyennes. Mais, comme de Reffye se familiarise en même temps et par ailleurs avec les processus stochastiques, notamment avec ses travaux sur la pollinisation du cacaoyer, il lui paraît naturel et tentant de tâcher de complexifier la représentation architecturale de la croissance du caféier en usant de ces mêmes processus afin de la rendre plus réaliste d'un point de vue botanique. En 1978, ces nouveaux travaux sur une modélisation stochastique de l'architecture du caféier sont bien avancés quand de Reffye s'en ouvre finalement

[1] Voir notre entretien [Reffye (de), Ph. et Varenne, F., 2001], p. 2.

à Yves Demarly[1]. Demarly lui répond tout de suite qu'il ne voit pas d'objections à tâcher d'en faire un travail de thèse. Il accepte ce faisant d'en être à nouveau le directeur.

Cependant, en 1978, un événement particulier dans la vie de de Reffye va donner une assise encore plus générale au contenu initial de ce projet de thèse. Car c'est une rencontre avec Francis Hallé et avec ses travaux qui va finalement l'orienter de façon décisive vers une extension opportune de la simulation initiale de la seule croissance architecturale du caféier à la simulation de la croissance de la quasi-totalité des plantes répertoriées, cela au regard du nouveau concept proposé alors par Francis Hallé lui-même et par Roelof A. A. Oldeman, son collègue néerlandais : le concept de « modèle architectural ». Sadi Essad, qui suit toujours de loin à ce moment-là les travaux de de Reffye, connaît en effet personnellement Francis Hallé. Grâce à lui, de Reffye est donc mis en contact avec ce professeur de botanique de la faculté d'Orsay. C'est une véritable révélation[2] pour de Reffye car il voit qu'il se trouve face à quelqu'un, un botaniste, qui peut comprendre son intérêt pour la visualisation des plantes, à la différence peut-être de ses collègues agronomes, et qui peut donc admettre que travailler à représenter visuellement des plantes ne signifie pas nécessairement sacrifier à la rigueur scientifique d'une approche quantitative ou formelle. De plus, il pressent que les programmes informatiques qu'il est d'ores et déjà capable de faire fonctionner pourront retrouver, sans grosses difficultés, la formalisation de Hallé encore toute classificatoire mais fondée sur une approche morphogénétique elle-même centrée sur la croissance individuelle des méristèmes.

Or, il faut comprendre qu'en se promettant de travailler dans le sens d'une plus grande fidélité à la botanique mais aussi dans celui d'un plus grand réalisme figuratif, les recherches de de Reffye allaient logiquement se trouver en confrontation avec de tout autres traditions scientifiques que celles de l'agronomie quantitative. Comme nous le verrons par la suite, en prenant ce tournant décisif vers la modélisation réaliste mais non immédiatement pragmatique, ses recherches allaient devoir en effet se positionner par rapport à d'autres travaux, plus anciens, enracinés dans d'autres problématiques, que ce soit des travaux de botanique, de biologie mathématique ou de morphologie quantitative bien sûr, mais aussi de synthèse d'images végétales par ordinateur en informatique graphique. Alors même que de Reffye n'aura pas en fait bénéficié de la connaissance approfondie de toutes ces autres traditions plutôt théoriques que nous avons présentées dans les chapitres précédents, loin de là, son travail, peut-être par chance, mais aussi et surtout parce que sa problématique initiale (agronomique et opérationnelle) n'avait pas été la même que chacune de celles qui caractérisaient les autres traditions, ne sera pas complètement assimilable à d'autres. Comme nous avons déjà insisté plus particulièrement sur le statut qu'elles ont chacune conféré à l'ordinateur, mises à part les approches de l'informatique graphique sur lesquelles nous reviendrons au moment opportun et qui se sont développées en parallèle et en concurrence directe avec celle de de Reffye avant qu'elle ne converge vers elles, nous serons mieux à même de concevoir ce que l'approche de de Reffye aura de commun avec elles ou ce qu'elle présentera, au contraire, de spécifique. Nous allons donc exposer les choix techniques de de Reffye pour sa thèse de 1979 et les suites qu'ils ont pu avoir, notamment avec la création plus tardive mais décisive de l'Atelier de Modélisation de l'Architecture des Plantes (AMAP) en 1986. Cette création d'un laboratoire à vocation d'apparence relativement spéculative au sein de ce qui sera le CIRAD peut en effet paraître rétrospectivement très surprenante si l'on ne se donne pas auparavant les moyens de comprendre précisément en quoi les travaux sur ordinateur de de Reffye et de son équipe, malgré leur caractère au départ quelque peu improvisé et exclusivement pragmatique, se

[1] Voir notre entretien [Reffye (de), Ph. et Varenne, F., 2001], p. 3.
[2] Selon l'expression même qu'il emploie dans [Reffye (de), Ph. et Varenne, F., 2001], p. 3.

sont trouvés finalement non totalement réductibles aux travaux purement spéculatifs antérieurs et ont pu ainsi créer d'authentiques passerelles entre la botanique et la biologie théorique, d'une part, et la biologie expérimentale et l'agronomie, d'autre part. Ce qui confèrera à la simulation la capacité inédite de faire le pont entre les disciplines empiriques-pragmatiques et les disciplines théoriques-descriptives. La simulation abandonnera le seul usage calculatoire et théorique qui avait été prioritairement le sien jusqu'alors dans le domaine des plantes. Elle entrera ainsi définitivement sur le terrain. En se mesurant à lui et à sa complexité, elle pourra même passer pour ce que nous pourrions appeler une « expérience du second genre ».

Mais pour comprendre comment cette évolution a pu se produire, il nous faut d'abord revenir dans ce chapitre sur le sens de cette révolution botanique en quoi a consisté l'introduction du concept de « modèle architectural ». Car c'est bien à elle que l'on doit l'impulsion que de Reffye a reçue dans le sens d'une plus grande généralité pour ses modèles de simulation : ce qui allait le mettre directement en porte-à-faux tant à l'égard du discours entendu dans les écoles de biologie théorique (modéliser = abstraire pour universaliser) qu'à l'égard de celui des praticiens des modèles de terrain (modéliser = sélectionner une représentation perspective mono-formalisée pour une utilisation singulière).

En 1978, lorsque de Reffye rencontre Francis Hallé, cela fait déjà au moins huit ans que ce dernier et son collègue Oldeman ont proposé une avancée conceptuelle considérable à la botanique en introduisant le concept de « modèle architectural ». Pour bien comprendre en quoi il y a un intérêt pour de Reffye à intégrer ce nouveau concept dans sa propre approche de la croissance des plantes et saisir en quoi sa méthode de modélisation, déjà d'emblée tournée vers l'informatique et la visualisation, est alors précisément à même de prendre en charge une modélisation botanique d'abord exclusivement verbale et graphique, il convient de revenir sur la naissance singulière de ce concept et sur son apport en botanique.

Naissance du concept d'« architecture végétative »

C'est à la fin des années 1940 que, sous l'impulsion des travaux du botaniste britannique Edred John Henry Corner (1906-1995), l'étude de l'architecture des plantes devient une discipline en soi. En fait, c'est dans le contexte plus particulier de la forêt tropicale de Bornéo et dans l'esprit d'une recherche tournée vers des questions de botanique évolutionnaire que Corner[1] adopte le concept de « morphologie » puis celui d'« architecture » pour désigner d'abord les seules structures aériennes végétatives des arbres. Mais très vite, ce concept s'étendra à toutes les plantes, aux herbes et aux lianes comme aux systèmes racinaires[2].

Ce qui caractérise l'esprit de Corner est son attention renouvelée à l'individu végétal compris comme un tout. C'est en cela qu'il propose en quelque sorte un retour à l'approche morphologique goethéenne. Corner arrive à une époque où il lui semble qu'il faut réunifier la

[1] Corner est en effet connu pour avoir proposé, dans ce contexte, la théorie de Durian. Il s'agit d'une théorie de l'évolution des fruits. Le Durian est une plante de la famille des malvacées que l'on trouve à Bornéo et dont le fruit est de la grosseur d'un petit melon. Les graines rejetées par ce fruit commencent à germer tout de suite au-dessous des arbres parents. C'est donc une grosse graine qui ne peut être transportée (elle n'a pas de dormance) : elle convient pour des arbres de la forêt primitive. Elle présente, selon Corner, la simplicité de ce qui est primitif. À l'inverse, les graines légères et ayant la faculté de dormance, comme celles du saule et du peuplier par exemple, manifestent une plus grande jeunesse au regard de l'évolution car elles témoignent d'une efficacité de dispersion acquise par l'expérience. Voir [Corner, E. J. H., 1964, 1970], pp. 247-250.

[2] [Barthélémy, D., Edelin, C. et Hallé, F., 1989], p. 89.

botanique[1]. Elle s'est entre-temps morcelée en physiologie (associée à la biochimie), en morphologie (étude des caractères) et en taxonomie des plantes (classement). Certes, la physiologie des plantes s'est considérablement développée ; mais elle ne permet plus de comprendre les plantes dans leur généralité[2]. Comme, d'autre part, les idées évolutionnistes, confirmées par les progrès de la génétique et la théorie synthétique, s'imposent de façon plus ferme, cette appréhension de la plante à l'échelle globale de l'individu devient nécessaire car la sélection opère en grande partie sur l'architecture totale de l'individu et sur les peuplements. C'est de cette nécessité dont témoignent les premiers travaux de Corner en architecture des plantes. Il s'agit donc, pour la botanique, de trouver un niveau biologique intermédiaire qui permette une intégration et une articulation des problématiques aussi bien physiologiques et morphologiques qu'écologiques et évolutionnaires.

À la fin des années 1960, les travaux du botaniste de l'ORSTOM Francis Hallé et de son collègue néerlandais, Roelof Arent Albert Oldeman[3], accentuent la sensibilité à ce niveau de questionnement écologique : ils conçoivent la forêt tropicale elle-même comme une totalité, dotée d'une certaine morphologie, et au cœur de laquelle des contraintes écologiques se manifestent. Pour eux, il existe donc une architecture de la forêt en tant que telle et pas seulement au niveau de l'arbre seul[4]. D'autre part, il savent, comme Corner, que la forêt tropicale est un objet scientifique privilégié en ce domaine car elle est comme une partie totale dans l'ensemble des forêts : de par sa richesse à nulle autre pareille, son étude permet souvent des généralisations pertinentes et rapides. C'est pourquoi, bénéficiant des infrastructures de recherche en outre-mer de l'ORSTOM, si particulières à la France, Hallé et Oldeman sillonneront la forêt guyanaise. Et c'est dans ce contexte que naît le concept de « modèle architectural ».

Francis Hallé est au départ un élève du botaniste Georges Mangenot. Ce dernier fut professeur à la Sorbonne puis à la faculté d'Orsay. Dans les années 1930, Mangenot avait été lui-même un collègue et un collaborateur de Léon Plantefol. En 1933, ils firent paraître ensemble un influent *Traité de cytologie végétale*. Après la guerre, Mangenot fut nommé directeur du centre de l'ORSTOM d'Adiopodoumé. Il se spécialisa en botanique tropicale et s'orienta vers cette approche récente issue notamment des écologues américains et que l'on nommait l'écologie dynamique[5]. Il apparaissait clairement, dès cette époque, que les botanistes devaient faire le voyage aux tropiques car la véritable variété végétale ne se trouvait nulle part ailleurs. Plus on s'approche de l'Equateur en effet, plus le nombre de plantes augmente. C'est en Côte-d'Ivoire que Mangenot, dans les années 1950, devint donc particulièrement attentif à la problématique des associations végétales. Et c'est par son intermédiaire qu'Hallé est envoyé à Adiopodoumé à partir de 1963. Il y

---

[1] « Corner symbolise cette tendance à la réunification de la Botanique, d'abord par son point de départ tropical, général, opposé au point de vue particulier tempéré, ensuite par son refus de traiter tout élément d'information autrement que dans le contexte de la plante entière, de son ontogenèse et de son histoire évolutive », [Oldeman, R. A. A., 1974], p. 12.

[2] [Oldeman, R. A. A., 1974], p. 11.

[3] R. A. A. Oldeman, alors jeune ingénieur agronome de l'Université de Wageningen, arrive en 1963 à la station néerlandaise du Centre ORSTOM d'Adiopodoumé, en Côte-d'Ivoire. Il y est initié aux tropiques humides. Il dirige cette station pendant un an. C'est là qu'il rencontre Francis Hallé qui, de 1963 à 1968, travaille lui aussi au centre. Ce dernier lui fait connaître l'approche architecturale. En 1964, Oldeman est intégré à l'ORSTOM et il est affecté au centre de Cayenne en 1965. Il y retrouve ponctuellement (deux mois en 1965) Francis Hallé avec lequel il collabore intensément. Francis Hallé, après une affectation de quelques années à l'Ecole Supérieure des Sciences de Brazzaville (Congo), au début des années 1970, deviendra professeur de botanique à l'Université du Languedoc (Montpellier). Il sera par la suite attaché à l'Institut de Botanique de Montpellier. Pour sa part, Oldeman soutiendra une thèse avec lui sur la notion de « réitération » et sur la morphologie de la forêt tropicale à Montpellier en 1972. Il deviendra par la suite professeur de botanique à l'Université de Wageningen. Pour ces précisions, voir [Oldeman, R. A. A., 1974], p. 5, [Hallé, F. et Oldeman, R. A. A., 1970], p. v et [Hallé, F., 1999], p. 115.

[4] [Oldeman, R. A. A., 1974], p. 6.

[5] Voir le chapitre de J.-F. Leroy *in* [Taton, R., 1964, 1995], pp. 775-777.

sera d'abord chargé de recherche auprès de l'ORSTOM puis directeur de l'Institut de Botanique d'Abidjan.

À la Sorbonne, Hallé s'était pourtant d'abord spécialisé en micro-paléontologie et, notamment, dans l'étude des micro-fossiles. Il avait publié quelques travaux en ce domaine[1]. Mais au cours, de ses études, il avait compris que c'était les plantes qui l'intéressaient le plus de par leur liberté et leur autonomie : elles ne demandent rien et s'acclimatent autant que possible aux conditions du milieu en y prélevant des choses très banales. Il leur trouvait ainsi une certaine magie. Il avait donc finalement infléchi son cursus vers la biologie végétale. Et il s'était inscrit en thèse à l'Université d'Orsay, auprès de Mangenot qui, entre-temps était devenu directeur de l'Institut de Botanique, aux côtés des botanistes Raymond Schnell et René Nozeran[2]. À son arrivée en Afrique donc, et sur les traces de Mangenot, Hallé travaille d'abord sur la biologie et la morphologie de certains dicotylédones appartenant à la tribu des Gardéniées ou Rubiacées (genre tropical des Gardenia). Cette première recherche donne lieu à une publication de près de 150 pages dans les Mémoires de l'ORSTOM en 1967. Dans ce travail, Hallé adopte une approche de type encore nettement classique et linnéen : il se consacre à l'étude des plantes *via* la caractérisation de leurs seuls organes sexuels. Mais un certain nombre d'événements le conduisent déjà à changer de perspective.

En 1964, Mangenot, très occupé par ailleurs, tarde en effet à donner son avis sur le manuscrit de thèse et un an se passe sans qu'il ne donne de nouvelles[3]. Dans cette difficile situation d'éloignement, Hallé décide de prendre ces atermoiements avec philosophie. Il laisse donc libre cours au changement de point de vue auquel il avait été conduit, une fois confronté à la réalité de la forêt équatoriale. Dans l'approche de ses maîtres, en effet, la partie végétative n'était pas considérée comme importante. La ramification des plantes était vue comme quelque chose d'inessentiel. Une sorte d'anarchie semblait y régner, de surcroît. Or, placé sur le terrain équatorial, Hallé constate que l'on y est rarement conduit à observer des fleurs : elles sont le plus souvent inaccessibles à l'observateur. En revanche, il remarque que la forme végétative des plantes est d'une grande clarté et d'une grande simplicité : il suffit de les dessiner tant il est vrai qu'elles apparaissent d'emblée comme des schémas[4]. Les ivoiriens eux-mêmes reconnaissent les plantes à leur seule forme végétative. Hallé se consacre alors quasi-exclusivement à l'observation architecturale et à une réflexion sur les formes végétales. L'expression même d'« architecture végétative » est proposée par lui dès 1964. Cette proposition terminologique se fixe en fait au cours de discussions avec René Nozeran. Ce dernier reconnut très vite la valeur de cette nouvelle approche et en encouragea le développement.

Cette même année, Oldeman arrive à l'ORSTOM et est conduit à collaborer avec Hallé. Ce travail commun sera fondateur. Il est publié en 1970 dans la monographie *Essai sur l'architecture et la dynamique de croissance des arbres tropicaux*. Cet ouvrage présente d'une part une observation et une expérimentation systématique des différents types d'architecture, d'autre part une synthèse de travaux dispersés et déjà publiés. En même temps, il propose une clarification et une stabilisation terminologique. Au terme goethéen de « morphologie », les auteurs choisissent de préférer définitivement le terme d'« architecture » car il s'agit de désigner par là les caractères morphologiques structuraux des plantes et non les caractères morphologiques comme la présence

[1] Voir notre entretien [Hallé, F. et Varenne, F., 2004].
[2] Nozeran venait alors d'arriver de l'Université de Montpellier.
[3] Finalement, Hallé soutiendra sa thèse à Abidjan en 1966. Nozeran en sera le directeur. Mangenot n'en sera qu'un rapporteur. Ce sera la première thèse soutenue à Abidjan.
[4] Selon les termes mêmes de Hallé. Voir [Hallé, F. et Varenne, F., 2004].

de latex, la pilosité ou la consistance des limbes[1], par exemple. Il s'agit de se pencher préférentiellement sur la configuration extérieure, sur la forme et la dynamique de croissance des arbres qui semblent déterminées de manière étroite par la génétique. Or ce travail exige des observations : il ne peut être accompli sur le seul matériel d'herbier. Comme le soulignent Hallé et Oldeman eux-mêmes, il faut avoir été durablement sur le terrain ou avoir mis en culture les espèces étudiées. Ce qui est difficile au vu des conditions de travail que cela impose[2]. Mais c'est précisément de ces conditions favorables dont ils ont pu bénéficier, dans les centres tropicaux français de l'ORSTOM. Leur méthode consiste ensuite à observer directement sur le terrain ou à faire pousser certains arbres de manière à en observer la morphogenèse alors qu'ils sont encore dans une phase dite « microclimatique », c'est-à-dire lorsque ces arbres bénéficient de conditions écologiques constantes et pratiquement optimales. Ce sont en fait souvent de jeunes individus, de moins de 15 mètres, présents dans le sous-bois tropical. C'est là que le « jeune arbre exprime librement, à l'abri des traumatismes écologiques, la *forme idéale* qui lui est dictée par sa constitution génétique »[3]. Après cette phase, on assiste en effet à une « altération de l'organisme spécifique sous l'influence du macroclimat »[4]. L'arbre a subi de nombreux traumatismes qui font que son port statistique ne ressemble plus à son port phénotypique des débuts. Oldeman a montré en effet que le traumatisme ou le simple vieillissement donne lieu à ce qu'il appelle des « réitérations » du « modèle architectural » à l'intérieur de la plante traumatisée ou âgée. Ces « réitérations » sont comme des rejets ou des troncs surnuméraires. Hallé explique ce phénomène par le fait que, lors du vieillissement ou lors d'un traumatisme, on assiste à un affaiblissement du « réseau de tensions morphogénétiques »[5]. En tous les cas, comme l'avait aperçu René Thom, dans cette période de sa vie au moins, l'arbre ne semble plus isomorphe à lui-même d'une période de temps à l'autre : il ne croît plus en restant isomorphe à son propre modèle architectural[6]. De façon selon nous décisive ici, Hallé reproche ainsi à René Thom de considérer que l'absence d'isomorphie interne est systématique chez tous les arbres et à tous les âges[7] : l'existence d'une possibilité de décrire les jeunes arbres par des modèles botaniques et graphiques, possibilité sur laquelle nous allons revenir, indique déjà que Thom se trompait manifestement sur ce point[8]. En fait, Hallé et Oldeman montreront qu'il existe moins d'une trentaine de ces « modèles architecturaux » pour les premières années de la vie d'une plante. La modélisation n'est donc pas impossible comme nous allons le voir, mais en un autre sens que celui de Thom, cela même si les idées de ce dernier ont pu passablement les aider à développer leur proposition[9].

---

[1] [Hallé, F. et Oldeman, R. A. A., 1970], p. 1.

[2] Dans la préface de leur ouvrage de 1970, le botaniste P. Champagnat, alors en poste à l'Université de Clermont-Ferrand, déclare : « Seule une analyse détaillée, faite dans ce 'biotope conservateur' et immensément riche qu'est la forêt tropicale humide, par des observateurs compétents et passionnés, ayant le goût de l'expérimentation, pouvait conduire à la synthèse dont nous avions besoin », [Hallé, F. et Oldeman, R. A. A., 1970], p. iii.

[3] [Hallé, F. et Oldeman, R. A. A., 1970], p. 3. C'est nous qui soulignons.

[4] [Hallé, F. et Oldeman, R. A. A., 1970], p. 4.

[5] [Hallé, F., 1979], p. 546.

[6] Voir [Oldeman, R. A. A., 1974], pp. 21-33 et [Hallé, F., 1979], pp. 543-546.

[7] [Hallé, F., 1979], p. 537.

[8] Voir ce passage déjà cité *supra*, *in* [Thom, R., 1972, 1977], p. 152 : « Chez les végétaux, la situation est tout autre [que chez les animaux] ; on ne peut parler d'homéomorphisme qu'entre organes pris isolément, tels que feuille, tige, racine, etc., mais il n'existe, en principe, aucun isomorphisme global entre deux organismes. » Voir également [Thom, R., 1972, 1977], p. 248 : « Comme on l'a dit plus haut, la morphologie globale du végétal n'est pas fixée ; le seul principe d'unité réside dans le jeu régulatif du seuil d'allumage des chréodes. Il en résulte qu'un grand nombre de formes globales sont possibles, le choix entre ces formes étant dû à des facteurs externes ou internes très minimes. »

[9] Dans son ouvrage plus tardif, *Esquisse d'une sémiophysique*, Thom continuera le malentendu en concédant qu'Hallé et Oldeman ont finalement montré, contre son attente initiale, qu'il y a avait bien une isomorphie de nature mathématique dans l'architecture d'un arbre. Voir [Thom, R., 1988], pp. 77 et 112. Mais c'est là trop leur concéder ! En fait, Hallé parlait dès le début d'une sorte d'isomorphie qualitative, plus lâche donc : celle affectant l'organisation du programme de mise

Naissance du concept de « modèle architectural »

C'est en tout cas par une attention toute particulière à l'expression optimale du génotype dans le phénotype juvénile, à sa « forme idéale » donc, que doit se caractériser l'observation architecturale des arbres sur le terrain ou en culture, selon Hallé et Oldeman. C'est bien d'ailleurs cette première expression de « forme idéale » qui caractérise le mieux l'esprit dans lequel Hallé et Oldeman proposeront, tout de suite après, le terme de « modèle » : il s'agit de désigner par-là un paradigme, quelque chose comme une idée platonicienne qu'ils héritent explicitement des spéculations goethéennes antérieures sur la plante primitive (*Urpflanze*)[1]. Cela n'a donc rien à voir avec un modèle mathématique au sens positiviste du plaquage d'un formalisme sur une réalité naturelle. C'est une modélisation avant tout graphique. Mais il ne s'agit pas pour autant d'en revenir à une proposition qui resterait spéculative et qui ne pourrait s'appliquer dans l'observation directe de la nature : son rôle est d'abord de permettre l'identification aisée des arbres sur le terrain « même en l'absence de fleurs et de feuilles »[2]. Il faut que cette notion permette de distinguer les différentes « stratégies de croissance »[3] à l'œuvre dans différentes espèces. En invoquant la notion de « forme idéale », leur but, à la différence de celui de Goethe, n'est plus prioritairement de rechercher à exprimer par un seul modèle une unité sous-jacente de la nature vivante, c'est-à-dire une origine commune hypothétique, mais plutôt de tâcher d'exprimer et de concevoir comment, dans les associations biologiques complexes auxquelles donne lieu une forêt tropicale, différentes « formes idéales » se manifestent de façon très stable et prédictible mais ensuite dérivent par rapport à leurs idéaux intrinsèques du fait d'interactions au niveau écologique.

L'unité que les botanistes de terrain Hallé et Oldeman cherchent à exprimer est donc une unité écologique des vivants en interaction puisqu'ils considèrent qu'existe une « morphologie » au niveau de la forêt elle-même[4]. Ils ne cherchent donc pas directement à exprimer une unité substantielle transpécifique tirant sa source d'une hypothétique plante primitive. Ils laissent donc de côté la question des filiations encore ouverte dans une perspective évolutionnaire. À la différence de Corner, et parce qu'ils travaillent tout de même dans une institution (ORSTOM) où prime une perspective de conservation et de valorisation des forêts tropicales, ils choisissent de ne pas concentrer sur des problèmes de paléobotaniques. En revanche, il est vrai qu'ils cherchent aussi à exprimer par leur « modèle architectural » une stabilité intraspécifique, donc une prédictibilité structurale, propre à chaque espèce ou plus précisément à chaque génome et à chaque clone. C'est la raison pour laquelle le concept de « modèle architectural » autorise, par

---

en place architecturale. L'arbre est isomorphe à lui-même pour Hallé en ce qu'il est déterminé par le même programme génétique de morphogenèse, même si cette isomorphie ne peut pas être transcrite par une quelconque règle d'auto-similarité quantitative interne, comme les fractalistes en avaient déjà fait l'amère expérience. La preuve du « modèle architectural » n'est pas du tout la preuve d'une isomorphie interne de type mathématique, contrairement à ce que pense un peu vite Thom en 1988.

[1] « Von Goethe ne séparait pas encore la morphologie de la physiologie, comme il le montre en associant la production des 'sucs plus purs' à l'approche du 'stade perfectionné' de la floraison. Nous voulons souligner la remarquable correspondance de ce modèle explicatif avec les notions récentes impliquant un changement métabolique – par exemple en ce qui concerne les phytohormones – à mesure que la plante parcourt sa séquence de différenciations », [Oldeman, R. A. A., 1974], p. 11.

[2] [Hallé, F., 1979], p. 542.

[3] Le recours à la notion de « stratégie de croissance » pour désigner le modèle architectural est dû au botaniste et élève d'Hallé, Claude Edelin. On la trouve dans sa thèse soutenue à Montpellier en 1977: « Images de l'architecture des conifères ». Voir [Reffye (de), Ph., 1979], p. 7.

[4] Ils comprennent ainsi l'association biologique un peu dans les mêmes termes que l'écologue américain Frederic Clements lorsqu'il parlait, au début du 20ème siècle, d'« unité naturelle » ou d'« organisme » pour désigner ce niveau d'intégration du vivant. Voir [Deléage, J.-P., 1991, 1994], pp. 93-95 et [Taton, R., 1964, 1995], p. 775.

nature, son emploi au pluriel : il y a plusieurs modèles architecturaux (au moins 24 observés au début des années 1970) qui se manifestent dans la forêt, alors qu'ils n'y a pas plusieurs « plantes primitives » chez Goethe, ce qui serait parfaitement absurde de son point de vue. Les « modèles architecturaux » sont d'ailleurs rarement observés à l'état pur car un arbre subit rapidement des interactions et des traumatismes de toute sorte d'où l'importance de leur méthode d'observation isolée. Cette faible observabilité des « modèles » sur le terrain renforce certes le caractère seulement « idéal » du modèle. Mais il n'annihile pas la valeur de la suggestion inséparablement conceptuelle et graphique de Hallé et Oldeman puisque les traumatismes seront justement plus facilement repérables sur le terrain dans leurs effets par contraste avec le « modèle » supposé être intrinsèque, de par la force du déterminisme génétique. Une plus grande compréhension de la dynamique de la forêt sera possible.

Toutefois, les raisons que nous avons invoquées jusqu'à présent ne permettent toujours pas de comprendre la décision des botanistes de recourir au terme précis de « modèle » plutôt qu'à l'expression de « forme idéale ». Ce choix est d'autant plus surprenant qu'ils ne veulent pas s'appuyer ce faisant sur l'usage du terme qu'en fait l'écologie des populations depuis les années 1920 avec son emploi des « modèles mathématiques ». En fait, pour interpréter ce que recouvre ce choix terminologique décisif, il faut d'abord rappeler la définition fondamentale qu'ils se donnent de l'architecture. Car c'est elle qui peut nous mettre sur la piste du contexte intellectuel et scientifique, particulier parce qu'en nette rupture avec celui, plus classique, de la biologie des populations, auquel ils ont, entre autres, emprunté le terme de « modèle ». C'est d'ailleurs cette définition qui fera ensuite particulièrement écho dans l'esprit de de Reffye[1] : « L'architecture de l'arbre est le résultat du fonctionnement de ses méristèmes. »[2] C'est-à-dire que les axes de l'arbre doivent être considérés comme autant de trajectoires déterminées parcourues par les méristèmes.

Il se trouve qu'Oldeman tient particulièrement à cette définition constructiviste, historicisante pourrait-on dire, de l'architecture dans la mesure où, selon lui, cela permet d'échapper à la représentation de l'arbre comme simple population statistique d'axes[3]. C'est une approche populationnelle, atomiste en un sens, puisque focalisée sur les actions des individus élémentaires que sont méristèmes. Mais ce n'est pas pour autant une approche populationnelle statistique. Car cette définition autorise, selon Oldeman, à adopter un point de vue globalement déterministe qui permet de continuer à parler de relations de causalité à l'échelle des groupes d'axes[4]. Oldeman propose ainsi de construire un nouveau concept en utilisant précisément le terme de « modèle » dans ce but : afin de marquer nettement son opposition avec l'approche statistique habituelle issue notamment des travaux du botaniste et tropicaliste danois Christen C. Raunkiaer (1860-1938). Ce dernier avait en effet développé une approche fréquentielle des caractères morphologiques permettant de mettre en valeur les corrélations entre les événements organiques (les « formes de vie ») et leur environnement (climat, sol, etc.). Par la suite, au cours des années 1960, le botaniste français Francis Scarrone, devant ce qu'il appelait l'« erratisme » des rythmes de croissance du manguier et de la plupart des arbres en milieu tropical, adoptait cette même approche statistique pour décrire la croissance d'un arbre[5]. À la fin des années 1960, Hallé et Oldeman se dressent

[1] Cette définition fondamentale est reprise comme un *leit-motiv* et quasiment telle quelle par de Reffye au stade introductif de toutes les présentations exhaustives de son modèle de 1979. Voir [Reffye (de), Ph., 1979], pp. 7 et 14, et [Reffye (de), Ph., 1981], p. 83.
[2] [Hallé, F. et Oldeman, R. A. A., 1970], p. 5.
[3] « Pour Hallé et nous même (1970), l'organisme végétal produit des axes végétatifs et inflorescentiels dans un ordre déterminé, tandis que pour un autre groupe de chercheurs, la plante est une population d'axes (cf. Scarrone 1969) », [Oldeman,, R. A. A., 1974], p. 12.
[4] [Oldeman, R. A. A., 1974], p. 13.
[5] [Oldeman, R. A. A., 1974], p. 12.

donc contre cette approche statistique dans la mesure où elle renonce d'emblée à comprendre et à discerner des causalités là où la génétique nous indique pourtant qu'elles existent fortement : dans l'expression du génome chez les jeunes arbres. La notion de « modèle architectural » naît donc bien d'une volonté forte de résister à l'approche probabiliste. Comment se fait-il alors qu'elle ait pu rencontrer avec bonheur l'approche de type « recherche opérationnelle » et donc déjà « stochastique » chez de Reffye ? Il nous faut préciser ce point.

Ce qui a motivé l'emploi du terme « modèle » en botanique

En fait, c'est dans le travail de Oldeman que l'on trouve les arguments les plus précis en faveur de la notion de « modèle architectural » conçue comme une stratégie de croissance déterministe. Or, l'argumentation s'autorise de deux références massives et curieusement assez exclusives l'une de l'autre : la référence aux modèles cybernétiques et la référence à la théorie des modèles de René Thom. Dans son mémoire de 1974, qui est la publication de sa thèse de 1972, Oldeman écrit d'abord :

« La notion de modèle est au centre de notre approche de la nature. Nous l'avons empruntée aux cybernéticiens tels que George (1965)[1]*, qui expose le principe consistant à mimer le système étudié, afin de pouvoir comprendre et prévoir le comportement de ce système en utilisant l'imitation appelée modèle. On distingue deux sortes de modèles : le modèle 'solide' (hardware model), qui se présente comme une maquette, tridimensionnelle, ou une image, bidimensionnelle, et le modèle 'mou' (software model), constitué de mots arrangés en description ou de conceptions mathématiques en formule (voir aussi Freudenthal, 1961*[2]*). »*[3]

Le modèle cybernétique a donc pour fonction, selon Oldeman, de permettre de comprendre en plus de prévoir, à la différence du modèle statistique. C'est pour cela qu'Hallé et lui-même l'ont choisi. Cependant Oldeman rappelle, à la suite de ce passage, que pour qu'un modèle ne devienne pas un fétiche ou une sorte d'objet magique mal maîtrisé, il doit devenir un objet scientifique manipulé consciemment et comme tel. C'est pour clarifier cette notion de « modèle scientifique » par opposition aux autres, qu'Oldeman change de registre et qu'il recourt ensuite aux critères proposés dès 1968 par René Thom dans un article paru dans les actes du premier colloque de biologie théorique organisé par Conrad Hal Waddington : « Une théorie dynamique de la morphogenèse »[4]. Ces critères sont au nombre de deux : d'une part l'indépendance du modèle vis-à-vis du substrat du système réel, ce sans quoi l'objectivité n'est pas garantie et ce grâce à quoi on peut en revanche parler de modèle indépendant du substrat[5] ; d'autre part, « le modèle scientifique exige l'expression de tous ses éléments en termes d'espace-temps à quatre dimensions » afin qu'il y ait une confrontation possible avec les observables du système réel. Il est

[1] Référence à l'ouvrage *Cybernetics and Biology* de Frank Honywill George paru en 1965.
[2] Référence à l'ouvrage collectif de Hans Freudenthal *The Concept and the Role of the Model in Mathematics and Natural and Social Sciences* paru en 1961. Voir [Freudenthal, H., 1961].
[3] [Oldeman, R. A. A., 1974], p. 14.
[4] Paru dans le premier tome des *Towards a Theoretical Biology*, série de collectifs dirigés par C. H. Waddington. Thom reprend et affine ces idées avec la notion de « modèle local » dans [Thom, R., 1972, 1977], p. 7 : « Un des intérêts essentiels de la méthode des modèles locaux ici préconisée est qu'elle ne préjuge en rien de la nature ultime de la réalité […] C'est grâce aux grandeurs associées aux observables que sera défini l'espace de phase de notre modèle dynamique, sans référence aux structures plus ou moins chaotiques sous-jacentes. »
[5] Oldeman cite ce passage de Thom (1968) : « … un champ morphogénétique sur un ouvert U de l'espace-temps réside dans la donnée d'un 'modèle universel' dont le processus donné est copié », [Oldeman, R. A. A., 1974], p. 14.

donc à noter que la référence à René Thom est décisive pour Oldeman en ce qu'elle l'autorise à proposer une démarche de « modélisation » déterministe comme alternative à l'approche classiquement probabiliste. Précisons que René Thom ramène en effet la controverse déterminisme/indéterminisme à une question de point de vue, c'est-à-dire de choix de modèle local. Si le modèle local mène à une structure instable, ce modèle sera indéterministe, s'il mène à une « stabilité structurelle », il donnera une image déterministe du système réel[1]. Mais, dans la nature pour Thom, il n'y a que des processus plus ou moins déterminés : la causalité est elle-même un processus graduel et différencié. En conséquence, il nous est loisible, et il est même souhaitable selon lui, d'adopter le niveau de modélisation qui permet justement le discernement de « stabilités structurelles » qui se « causent » les unes les autres. Or, c'est bien précisément à partir de cette idée de « stabilité structurelle », perçue à un certain niveau et à l'aide d'un certain type choisi de modèle, qu'Hallé et Oldeman construisent finalement leur propre concept de « modèle architectural » : « Les modèles arborescents (Hallé et Oldeman, 1970) sont déterministes ou structurels à un niveau d'intégration plus grossier que celui du déterminisme des axes. »[2]

Oldeman interprète la liberté que donne Thom au biologiste de modéliser avec les concepts qu'il veut (formels, discontinus ou différentiels…) en terme de liberté de choix, pour l'écologue et le botaniste, du « niveau d'intégration » à considérer. Il interprète le déterminisme de Thom, fondé sur une ontologie mathématiste topologique et différentielle, en une autorisation de se représenter le contrôle génétique en termes de causes déterminées au niveau des groupes d'axes. Là est le glissement et le transfert conceptuel. Pour Oldeman, l'approche statistique a choisi le niveau des axes des arbres : elle tend naturellement à mettre en évidence l'homogénéité statistique de ce niveau. Mais elle perd les déterminismes. Comme le précise Oldeman, ce niveau d'intégration en écologie est comparable à ceux qui mènent aussi à la mise en évidence de certaines homogénéités en physique : « Le 'gaz idéal' et le 'mouvement sans friction. »[3] Le travail qu'il effectue avec Hallé consiste en revanche à mettre au jour un niveau d'hétérogénéité organique où des stabilités structurelles génétiquement déterminées se manifestent et donnent lieu à des relations œuvrant à l'intérieur de ce niveau et interprétables et prévisibles en des termes causalistes ou, à tout le moins, déterministes : « Si les chercheurs probabilistes essaient de capter des situations homogènes entre deux niveaux hétérogènes, notre méthode a été de capter l'hétérogénéité entre deux niveaux d'homogénéité. »[4] C'est en cela qu'il y a au moins complémentarité et non mutuelle exclusion entre les deux types de modélisation (statistique et déterministe) pour Oldeman. Avec l'avantage que le niveau d'approche déterministe qu'il propose, comme chez Thom, permet d'interpréter les structures en des termes biologiquement compréhensibles et botaniquement significatifs, ce que ne permet pas l'approche statistique.

On voit donc que la légitimation qu'Hallé et Oldeman ont trouvée *a posteriori* du côté du mathématicien René Thom dépasse largement et contredit même d'une certaine manière l'approche passablement mécaniste des cybernéticiens précédemment évoqués. Elle tient surtout à cet appui ferme sur la légitimité qu'il y aurait à distinguer entre divers niveaux d'intégration. Aux yeux de Oldeman surtout, cette distinction permet de rendre légitime l'hypothèse de niveaux privilégiés où des « îlots de déterminisme » sont préservés et observables par le botaniste, comme c'est le cas en biologie du développement pour les chréodes waddingtoniennes, telles que Thom

[1] [Thom, R., 1972, 1977], pp. 122-123.
[2] [Oldeman, R. A. A., 1974], p. 14.
[3] [Oldeman, R. A. A., 1974], p. 15.
[4] [Oldeman, R. A. A., 1974], p. 15.

les conçoit en tout cas à l'époque[1]. Hallé semble toutefois moins persuadé de détenir là un modèle scientifique au sens propre du terme[2].

Au final, le « modèle architectural » est en tous les cas défini comme le programme qui « détermine les phases architecturales successives d'un arbre ». C'est une « stratégie de croissance inhérente » à la plante. C'est-à-dire que la focalisation se fait sur le « processus endogène » de croissance, abstraction faite, dans un premier temps, des interactions avec l'environnement. Dans un article commun de 1989, les botanistes Daniel Barthélémy, Claude Edelin et Francis Hallé emploient toutes les expressions que nous avons citées précédemment mais ils précisent encore une dernière fois la définition par ces mots : le modèle architectural « exprime la nature et la séquence des activités [qui ont lieu] dans le processus morphogénétique endogène de l'organisme, et correspond au programme fondamental de croissance sur lequel est établie l'architecture entière »[3].

Un modèle non mathématique

Or, remarquons-le, comme il contient des étapes foncièrement hétérogènes (et choisies justement pour leur hétérogénéité relative !), il ne peut être un modèle formalisable mathématiquement. C'est en ce sens qu'il n'est en fait même pas un modèle au sens de Thom, puisqu'il n'est pas réductible à un modèle géométrique. Il reste donc un modèle certes dynamique (i.e. descripteur d'une historicité), mais purement verbal et graphique. Tout en étant rigide et assez formel, il se focalise sur quatre caractéristiques purement hétérogènes entre elles (d'où leur impossible quantification) mais botaniquement significatives et diversement exprimables par des « symboles graphiques »[4] divers :

1) le type de croissance (rythmique ou continue) ;
2) la structure de ramification (présence ou absence de ramification végétative, ramification sympodiale ou monopodiale, ramification rythmique, continue ou diffuse) ;
3) la différenciation morphologique des axes (orthotropie ou plagiotropie) ;
4) la position de la sexualité (terminale ou latérale)[5]

Un « modèle architectural » au sens de Hallé et Oldeman est donc entièrement défini lorsque l'on dispose d'une combinaison particulière de ces caractéristiques morphologiques et de leurs symboles graphiques afférents. Chaque combinaison rencontrée dans la nature (certaines ne le sont pas) a reçu le nom d'un botaniste connu. Ces 24 combinaisons sont déterminées par observation sur le terrain et par le suivi de l'activité des méristèmes[6].

C'est donc bien volontairement que le concept de « modèle » est choisi par Hallé et Oldeman : il est plus lâche que celui de « type » employé en taxonomie. Il est uniquement « fondé

[1] [Thom, R., 1972, 1977], p. 123. On sait que Waddington a été peu convaincu par cette relecture spéculative. Voir la préface de Waddington lui-même *in* [Thom, R., 1972, 1977], p. xix.
[2] Voir [Hallé, F., 1979], p. 537 : « peut-être ne sont-ils pas de véritables modèles… »
[3] "It expresses the nature and the sequence of activity *in* the endogenous morphogenetic processes of the organism and corresponds to the fundamental growth program on which the entire architecture is established", [Barthélémy, D., Edelin, C. et Hallé, F., 1989], pp. 89-90. Hallé avait écrit en 1979 : « C'est l'expression visible du programme génétique », [Hallé, F., 1979], p. 542.
[4] Selon l'expression de [Hallé, F., 1979], p. 538.
[5] [Barthélémy, D., Edelin, C. et Hallé, F., 1989], p. 90.
[6] Par « enregistrement des étapes successives de la morphogenèse sous forme de croquis et de documents photographiques », [Hallé, F. et Oldeman, R. A. A., 1970], p. 5.

sur l'étude des structures et des fonctionnements méristématiques » et il est donc indépendant du type biologique des plantes[1]. Or c'est précisément cette relative systématicité, cette prise en compte de la forme globale dans sa genèse, dans son historicité, et enfin cette faculté de réduire la variété architecturale à des combinaisons d'un petit nombre de règles élémentaires qui rend possible la convergence entre ce nouveau concept de la botanique et la méthode de modélisation fractionnée adoptée jusque là par de Reffye. C'est une modélisation qui enchaîne des séquences de choix et qui, à ce titre au moins, prête à une informatisation, *a priori*.

[1] [Hallé, F. et Oldeman, R. A. A., 1970], pp. 9-10 ;

CHAPITRE 27 - Une simulation architecturale, aléatoire et universelle : la thèse de 1979

Lorsque, de son côté, en 1978, de Reffye décide de mettre en forme son travail de thèse, il n'a qu'à reprendre la méthode qu'il a développée lui-même auparavant, de manière il est vrai opportuniste et quelque peu bricolée, dans le contexte agronomique qui a été jusqu'alors le sien : 1- modélisation fractionnée ; 2- simulation spatiale ; 3- simulation aléatoire. Très vite, de Reffye sait qu'il peut ainsi atteindre le but qu'il s'est fixé : procéder à une simulation la plus réaliste possible visuellement et du point de vue de la botanique, au moins pour le caféier. Les critiques qu'il formule de manière circonstanciée, au début de son mémoire de thèse, à l'encontre des modélisations antérieures de l'architecture et la croissance des plantes ne rendent donc pas compte des idées motrices qui l'ont effectivement mené à la réalisation qui a été la sienne dans son travail de recherche. Ce ne sont pas véritablement elles qui l'ont conduit vers la solution informatique. Nous les donnerons donc à lire comme des critiques faites essentiellement *a posteriori* : en tant qu'ingénieur agronome, de Reffye ne connaissait pas la plupart de ces travaux de biologie théorique et de modélisation de la plante individuelle avant qu'il ait mis au point sa propre solution mathématique et informatique, en 1978. Ce qu'il faut en effet souligner fortement, c'est le fait que de Reffye n'appartient ni au milieu de la biologie théorique officielle qui commence à se structurer à l'époque en France, notamment sous l'impulsion de Pierre Delattre (1926-1985)[1], ni au milieu des écologues ou biologistes modélisateurs qui, à l'INRA ou à l'ORSTOM, et sous l'impulsion de personnalités comme Jean-Marie Legay, se sont entre-temps regroupés, principalement autour des actions concertées de la DGRST, ainsi que nous l'avons vu.

Structuration et institutionnalisation de la biologie théorique en France

1975 - 1981

Au début des années 1970, la pratique théorique des formalismes mathématiques en biologie n'est pas reconnue en France comme une activité véritablement unifiée et structurée[2]. Les chercheurs concernés sont dispersés dans des laboratoires de médecine, de physico-chimie, de biochimie, d'histologie, de biophysique, de biologie mathématique ou de botanique[3]. À partir de 1975, cette activité va être progressivement reconnue et officialisée. Cette année-là en effet, le professeur Jean-Henri Maresquelle (1898-1977)[4] de l'Institut de Botanique de Strasbourg fonde un

[1] Voir l'encadré.
[2] Voir nos indications précédentes sur Pinel, Vendryès et Collot.
[3] Cette liste non exhaustive nous est suggérée par l'observation des origines des participants aux premières écoles de Biologie Théorique.
[4] Jean-Henri Maresquelle passe l'agrégation de sciences naturelles en 1923, la même année que Georges Teissier. Il soutient une thèse en Sorbonne en 1929 sur le parasitisme des Urédinées avant de se pencher, dans les années 1930, sur la morphologie des plantes et sur son déterminisme génétique. Il dirige plusieurs colloques de morphologie, à Strasbourg, au cours des années 1960. Il y est, entre autres, directeur du Jardin Botanique de 1945 à 1969. Il sera longtemps doyen de l'université de Strasbourg. Dans une de ses dernières publications (1976), il proposera l'idée de « programme morphogénétique » pour expliquer le déterminisme de la morphogenèse végétale.

club de discussion informel, et sans moyens propres, mais dans lequel il regroupe des collègues d'horizons très différents autour de thèmes interdisciplinaires comme « thermodynamique et biologie »[1]. Ce club portera son nom (« club Maresquelle de biologie théorique ») après sa mort accidentelle en 1977. Il réunit deux fois par an une vingtaine de chercheurs dans des locaux de la rue d'Ulm. À partir de 1980, Yves Bouligand, alors directeur du Laboratoire d'Histophysique de l'EPHE et rattaché au centre de Cytologie Expérimentale du CNRS d'Ivry-sur-Seine, reprend l'animation de ce club. En 1978, il avait déjà dirigé trois colloques sur le thème « La morphogenèse : de la biologie aux mathématiques »[2]. Derrière ces travaux dispersés, transparaît en fait la volonté commune de combattre l'hégémonie de la biologie moléculaire et de reprendre le flambeau de d'Arcy-Thompson en s'aidant des nouvelles mathématisations « dynamiques » issues de la physique (Prigogine), des mathématiques de la qualité issues de la topologie (Thom) ou encore des formalismes axiomatiques (Lindenmayer, Lück). En 1977, devant le succès certain de cet entreprise au moins au vu du nombre de chercheurs impliqués, le CNRS, en la personne de Michel Thellier, alors chargé de Mission auprès de la Direction des Sciences de la Vie, confie à Pierre Delattre l'organisation d'une Ecole de Biologie Théorique à insérer, au départ, dans le seul cadre de la Formation Permanente du CNRS. Le biochimiste qu'est Pierre Delattre travaille alors au Département de Biologie du Commissariat à l'Energie Atomique (CEA). Parti de problématiques biochimiques de dosimétrie, au début des années 1970, il s'était illustré par des réflexions épistémologiques sur les conditions des transferts rigoureux de concepts de la physique à la chimie, et de la chimie à la biologie[3]. En 1978 et 1979, en prélude à la mise en place de cette Ecole de Biologie Théorique, il est chargé par le CNRS d'organiser à l'ENS, avec Michel Thellier, un colloque sur le thème « Elaboration et justification des modèles – Application en Biologie »[4]. En parallèle, il participe également aux travaux de l'ATP/CNRS (Action Thématique Programmée de la section Sciences Pour l'Ingénieur du CNRS) présidée par un économiste du CNAM, Jacques Lesourne[5], et intitulée « Analyse des systèmes »[6]. À partir de 1980, d'abord grâce aux fonds de la Formation Permanente du CNRS, Delattre encadre donc les premières Ecoles[7]. En novembre 1981, est décidée la création de l'AMTB : Association pour le développement des Méthodes Théoriques destinées à la Biologie. Cette création se fait essentiellement dans le but d'offrir une structure juridique qui permette une diversification des financements, notamment venant de divers organismes publics mais aussi privés : le CNRS ne veut pas assurer à lui seul le financement de cette formation qui se trouve sur ce point en concurrence directe avec les formations en microbiologie et en génie génétique[8]. Il est hors de question pour le CNRS d'empiéter sur ces

[1] Voir le site de la Société Française de Biologie Théorique sur ce point : http://www.necker.fr/sfbt/orig.html.
[2] Dont les actes ont paru en 1980 : [Bouligand, Y., 1980].
[3] Voir [Lesourne, J., 1980], Tome II, pp. 19-20.
[4] Dont les actes sont publiés en 1979 : [Delattre, P. et Thellier, M., 1979].
[5] C'est le professeur Jean Lagasse alors Directeur scientifique du secteur Sciences Physiques pour l'Ingénieur du CNRS qui avait mis en place le comité de direction de l'ATP. Voir [Lesourne, J., 1980], p. x. Afin de montrer le caractère caduc de l'opposition tranchée entre recherche fondamentale et recherche appliquée, le secteur SPI mettait alors l'accent sur l'analyse des systèmes et sur la modélisation. Voir sur ce point [Ramunni, G., 1995], p. 86.
[6] Cette ATP « Analyse des systèmes » a donné lieu à une publication en deux volumes : [Lesourne, J., 1980].
[7] Elles se tiennent à l'Abbaye de Solignac (Haute-Vienne) tous les ans pendant une vingtaine de jours. À partir de 1991, elles auront lieu jusqu'à aujourd'hui à Saint-Flour. L'AMBT deviendra la Société Française de biologie Théorique en 1985. Selon Yves Bouligand, qui deviendra quelque temps président de la SFBT, à la suite de Pierre Delattre, « le principe [de ces Ecoles] était d'accueillir des chercheurs de formation soit biologique, soit médicale, soit de formation physico-chimique ou mathématicienne, en leur proposant des cours axés sur les mathématiques pour les premiers et l'inverse pour les seconds, avec une série de conférences communes sur les thèmes majeurs de la modélisation en biologie », [Solignac, 1994], p. 3.
[8] Pour ces précisions, voir [Le Guyader, H., 1982], pp. 469-474.

orientations prioritaires. On perçoit là un scepticisme évident de la part de ses instances dirigeantes.

Dans ce premier paragraphe, nous allons donc exposer et commenter les critiques successives que de Reffye est à même de faire dès 1979 face aux autres approches de la modélisation de la morphogenèse des plantes. Elles sont très précieuses pour notre problématique. Car, pour la première fois, elles vont nous permettre de mettre systématiquement en perspective tous les auteurs antérieurs, assez isolés, dont nous avons précisé jusqu'à présent les approches sans les voir véritablement converger les unes vers les autres ni aucune en particulier vers une méthode de modélisation à la fois universelle et opérationnelle.

Une vision occidentale limitée

Dans un premier temps, de Reffye reprend point par point les insuffisances des approches antérieures dans le cas de la modélisation de la croissance de la plante individuelle. Il y a une idée commune qui sous-tend tout son propos : les modèles mathématiques théoriques n'ont pu prospérer et ils n'ont pu séduire qu'à la faveur d'une ignorance propre à notre perception occidentale des plantes. Il s'agit de cette ignorance dans laquelle nous sommes ordinairement à l'égard de la richesse et de la diversité des architectures végétales réellement observables dans la nature. Un habitant des pays tempéré rencontre régulièrement tout au plus 3 modèles architecturaux alors qu'en sillonnant la forêt tropicale, on peut en observer près de 24 !

D'ordinaire, selon lui, on insiste sur les processus de ramification alors que les processus de mortalité des méristèmes sont tout aussi importants pour la constitution de l'architecture végétale. Ainsi de Reffye attribue-t-il l'intérêt que ses prédécesseurs ont manifesté pour l'analogie entre les arbres biologiques et les réseaux hydrographiques (Horton - 1944, Leopold - 1971) à cette surestimation du rôle de la ramification et au fait qu'ils sont partis un peu trop vite du principe que l'on pouvait généraliser ce qui ne s'observe couramment que chez les arbres de milieu tempéré : l'identité morphologique des axes aériens[1]. C'était encore supposer trop d'homogénéité interne dans les arbres. Horton et ses successeurs n'ont testé leur hypothèse théorique d'inspiration thermodynamique que sur des arbres bien connus, comme le pommier ou le cyprès. Ils ont cru pouvoir donner ainsi la règle générale pour la détermination du nombre et de la longueur des branches d'un arbre quelconque. Pour de Reffye, contrairement à ce qu'affirme Leopold, ils n'ont en fait aucunement démontré la généralité, même grossière, de leur proposition théorique. De Reffye suggère que la convergence entre l'architecture des arbres des milieux tempérés et celle des réseaux hydrographiques ne soit tout au plus que fortuite. Cette convergence, si elle existe, ne repose pas en effet sur une authentique prise en considération du fonctionnement biologique des bourgeons : « Les réseaux hydrographiques ont des branchements aléatoires diffus, alors qu'une ramification d'arbre ne peut s'opérer qu'à partir d'un bourgeon localisé. »[2] De plus, il est des modèles architecturaux, comme le modèle de Roux (qui décrit justement l'architecture du caféier dont de Reffye était parti) où l'identité morphologique des axes peut être mixte : à la fois orthotrope et plagiotrope. Le tronc y est orthotrope mais les branches y sont plagiotropes[3].

Après cette critique de l'approche thermodynamique par la « loi de Horton, de Reffye en vient à cette méthode, plus ancienne encore, de détermination des angles de ramification et de la

[1] [Reffye (de), Ph., 1979], p. 7.
[2] [Reffye (de), Ph., 1979], p. 8.
[3] Voir [Reffye (de), Ph., 1979], p. 165.

section des rameaux à partir d'une théorisation physico-mathématique fondée sur les phénomènes hydrauliques des flux de sève : il s'agit bien sûr de la « loi de Murray » (1926-1927). Cette méthode est notable pour de Reffye car la loi à laquelle elle parvient est bien observée dans des contextes de vascularisation. Il fait toutefois remarquer que Murray ne prend aucunement en compte la courbure naturelle des branches : le principe selon lequel l'angle de ramification minimise le travail mécanique lors du passage de la sève ne vaut donc pas si, de toute façon, la branche est courbée immédiatement après son insertion, soit par la gravité, soir par une tendance à l'orthotropie. Pour insister sur le caractère notoire de ce fait botanique, de Reffye rappelle que Léonard de Vinci l'avait déjà remarqué[1]. Il serait donc nécessaire de dissocier ce qui détermine intrinsèquement (c'est-à-dire pour lui génétiquement) la plante à tel angle de ramification de ce qui la détermine mécaniquement à telle courbure, d'où l'importance que de Reffye voudra donner à nouveau, dans ce cadre plus général, à son module informatique (déjà introduit en 1976) de prise en compte des problèmes mécaniques de verse et de casse. De plus, les botanistes distinguent clairement une pousse immédiate du rameau (ramification sylleptique) d'une pousse retardée (ramification proleptique). Comme l'hypothèse de Murray implique aussi une déviation de l'axe principal par rapport à son orientation initiale au niveau de la jonction de l'axillaire, on voit mal comment un rameau proleptique pourrait *après coup* « modifier la direction déjà fixée de l'axe principal »[2] pour se conformer à cette règle. Il ne semble pas, là non plus, que les principes suivis par la morphogenèse botanique se satisfassent du schéma inspiré de l'analogie vasculaire. Un simple « principe d'optimalité physiologique » comme celui de Murray, conçu lui-même sur le modèle des principes physiques d'optimalité, néglige les effets de retard dans les ramifications végétales. Selon nous, ce que de Reffye découvre ici, c'est le fait que l'optimalité, si elle existe peut-être bien dans les phénomènes vivants, y est *essentiellement déstructurée* et *délocalisée* tant d'un point de vue strictement spatial (cela, les néo-mathématismes contemporains prétendaient déjà s'en charger, comme on l'a vu), mais aussi *temporel*, au cours de l'ontogenèse. C'est cette déstructuration à la fois spatiale et temporelle qu'il faut donc affronter prudemment avec les formalismes et les simulations.

Enfin, de même que pour la théorie précédente, la théorie de Murray ne peut valoir pour des axes mixtes pas plus qu'elle ne peut valoir dans le cas de réitérations où l'angle que le rejet forme avec l'axe principal peut être considérable. La modélisation mathématique fondée sur le métabolisme que propose Rashevsky (1944, 1960) présente les mêmes insuffisances pour de Reffye. Cette « loi de Rashevsky », rappelons-le, formalise une autre observation connue de Léonard de Vinci et qui suggère que la surface totale des sections de rameaux d'ordre K est égale à celle des rameaux d'ordre K+1.

Pour de Reffye, toutes ces modélisations inspirées par des analogies physiques ou par des réductions aux propriétés mécaniques du métabolisme échouent donc dans la mesure précise où elles croient à tort avoir saisi grossièrement ce qui fait l'essentiel du moteur morphogénétique de l'architecture d'une plante alors qu'en fait elles ne s'avèrent être, *a posteriori*, que des plaquages *ad hoc* et superficiels sur un phénomène végétal autrement plus compliqué et donc jusque là très partiellement connu. Mais le problème réside bien dans le fait que l'on ignorait jusqu'à présent cette ignorance. Et l'illusion a pu régner longtemps à cause de cette ignorance de second degré. De Reffye, n'étant pas lui-même botaniste, mais connaissant et modélisant déjà la flore tropicale, en particulier le caféier, comprend que c'est de la botanique tropicale, c'est-à-dire de la science

[1] Voir [Vinci (de), L., 1508-1518, 1942, 1987], p. 323 : « Les branches des plantes forment une courbe à la naissance de chaque petit rameau, et elles bifurquent quand se produit cet autre rameau. »
[2] [Reffye (de), Ph., 1979], p. 8.

prospective et descriptive de la réalité végétale dans sa complète diversité, que l'on peut attendre les rectifications qui s'imposent. En cela, il s'accorde pleinement avec Francis Hallé. Du point de vue de la botanique, dont il se réclame dans l'introduction de son mémoire de thèse, tous ces travaux mono-formalisés méritent finalement la même critique en ce qu'ils ont toujours considéré la plante comme un « objet théorique »[1], c'est-à-dire comme un objet dont on pouvait abstraire les détails, sans grande perte, dans les représentations et dans les divers scénarios que l'on se proposait pour en expliquer la genèse. C'est, pourrait-on dire, cette hypothèse d'« abstractabilité » vis-à-vis de l'objet plante que conteste de Reffye. Le but, sans doute louable par ailleurs, de ces « modèles théoriques »[2] est bien d'« expliquer »[3] la ramification. Mais, pourrait-on ajouter, avec les progrès de la science descriptive afférente, il est clair pour de Reffye que ces modèles que le théoricien pouvait faire accepter par l'homme de terrain (agronome, botaniste) au moins dans un rôle d'analogies grossières mais inspirantes[4], sont désormais clairement réfutés dans leur prétention à dire ne serait-ce que la généralité des processus architecturaux.

Limite de la modélisation mathématique

De façon significative, au début des années 1970, à l'ORSTOM, il y eut tout de même une tentative de modélisation qui se voulait à la fois purement mathématique et fidèle aux données de terrain sur l'architecture des plantes. De manière isolée, une série d'articles allant dans ce sens (« Modèles mathématiques de structures chez les végétaux »[5]) avait en effet été publiée par un chercheur de l'ORSTOM, Pierre Franquin, entre 1970 et 1974. Franquin était alors en poste au centre de Bondy, en Ile-de-France (93). Ce dernier avait d'abord travaillé, au début des années 1950, sur le « comportement physiologique et parasitaire du cotonnier » en Côte-d'Ivoire[6]. De retour en métropole, et loin du terrain, il s'était par la suite plus particulièrement intéressé à la phyllotaxie du cotonnier, mais essentiellement, de son propre aveu, à partir de travaux publiés par d'autres[7]. Dans le contexte de l'ORSTOM, le prétexte de ses recherches restait toutefois agronomique : il s'agissait d'essayer de trouver à terme des équations mathématiques susceptibles de prédire la production végétale à partir de la prise en considération de la morphogenèse. Informé et imprégné de la théorie des hélices foliaires de Plantefol, Franquin croyait qu'il était possible de ne pas en tirer les mêmes conséquences pessimistes que son auteur au sujet des mathématisations de la forme. Franquin montrait, en effet, que si l'on s'en tient aux plantes qui ne présentent que deux hélices foliaires comme le cotonnier, l'arachide ou le riz, et si l'on « fait abstraction de la nature, de la forme, de la fonction des divers organes »[8] présents à chaque nœud, on peut arriver à écrire des équations algébriques de récurrence portant sur le nombre d'organes à chaque nœud du végétal. On fait alors apparaître un triangle de Pascal pour l'expression de l'ordre de ramification et du nombre d'organes à cet ordre et l'on retrouve également les suites de Fibonacci si classiques dans les modèles de phyllotaxie. La méfiance que

[1] [Reffye (de), Ph., 1979], p. 9.
[2] [Reffye (de), Ph., 1979], p. 9.
[3] Selon le terme précis de [Reffye (de), Ph., 1979], p. 9.
[4] Ainsi, au sujet de la « loi de Horton », de Reffye concède qu'elle « constitue une intéressante incursion des principes de la physique sur du matériel biologique », [Reffye (de), Ph., 1979], p. 8.
[5] [Franquin, P., 1970], p. 77.
[6] [Franquin, P., 1970], p. 125.
[7] [Franquin, P., 1970], p. 80.
[8] [Franquin, P., 1970], p. 80. Ce qui indique bien que l'on a là affaire à quelque chose de purement « abstrait » : le modèle est purement mathématique car il n'est pas fondé sur une interprétation physicaliste.

Plantefol enseignait à l'égard des idéalisations mathématiques semblait donc pouvoir être relativisée si l'on rendait un peu plus subtil l'outillage mathématique.

Avant d'indiquer la limite que de Reffye perçoit à ce genre de travail, il est important de bien comprendre la conception que se fait Franquin d'un bon modèle scientifique, ce par quoi il légitime en dernière analyse son approche et son résultat. Dès le départ, Franquin refuse en effet catégoriquement de considérer un « simple ajustement de fonction à des données observées »[1] comme un véritable modèle. Il rejette donc totalement l'approche biométrique. Un modèle doit pouvoir être un « modèle de référence », c'est-à-dire que ses « paramètres doivent être donnés *a priori* » et ils « doivent être fixés numériquement par la théorie et non pas calculés à partir de données d'observation, par les moindres carrés, par exemple »[2]. Franquin s'inscrit en fait ici explicitement dans la mouvance de la biologie théorique telle qu'elle est alors prônée en France depuis le début des années 1960, sous l'impulsion des idées de Rashevsky, par Francis Collot, notamment au travers de sa propre *Revue de Biologie Mathématique*[3]. Franquin, comme Collot, s'inspire alors de la reconstruction axiomatique des mathématiques occasionnée par les mathématiciens eux-mêmes. Ainsi, selon lui, le cœur d'un véritable modèle doit être la notion de « structure », c'est-à-dire une « relation entre les éléments d'un ensemble »[4]. Dans ces conditions, l'hypothèse très forte de Franquin et qui se révèle être à l'origine de sa méthode de modélisation mathématique consiste à admettre le point suivant :

« Il y a structure à tout niveau d'organisation, chacune constituant une sous-structure de la structure immédiatement sus-jacente : aux niveaux moléculaire, particulaire, cellulaire… pour l'échelle microscopique, puis à ceux de l'organe, du groupe d'organes, de la plante entière pour l'échelle macroscopique, le niveau tissulaire faisant la transition. À cette dernière échelle, seule considérée ici, la structure de la plante est une composante de son architecture, composante abstraite, donc mathématisable, qui se manifeste dans le nombre d'organes et, comme va le montrer la formalisation des gradients d'espace et de temps du végétal, dans leurs relations spatiales et temporelles. »[5]

Pour Franquin, il y a donc lieu de supposer qu'à tout niveau d'organisation du vivant (comme de l'inerte d'ailleurs), il correspond une structure, c'est-à-dire un système de relations nécessairement formalisables, donc un système formel, donc une structure mathématisable. Le « mathématisable » se suffit d'être abstrait, c'est-à-dire simplement abstrait de sa particularité organique, selon Franquin. À partir du moment où il fait nombre, l'abstrait doit pouvoir faire système structuré. L'attention à la seule phyllotaxie, c'est-à-dire ici au seul arrangement des nœuds et au nombre des organes, impose de faire abstraction des différences morphologiques et fonctionnelles. Moyennant cette abstraction, on dispose d'un « modèle général » calculable à la main et dont les déviations spécifiques observées sur le terrain ne consisteraient qu'en autant de variations par rapport à ce « fonds commun »[6].

---

[1] [Franquin, P., 1972], p. 4.
[2] [Franquin, P., 1972], p. 4.
[3] Voir [Franquin, P., 1972], p. 21 et [Jean, R. V., 1978], pp. 3 et 7. Voir, plus particulièrement, cette évocation d'un article de Collot de 1969 : « F. Collot affirme que le terrain d'entente entre mathématiciens et biologistes se situe 'dans le val obscur et assez médiocre de la statistique' et que 'la plupart des concepts employés actuellement en biologie ne sont que des pseudo-concepts scientifiques' », [Jean, R. V., 1978], p. 3.
[4] [Franquin, P., 1972], p. 4.
[5] [Franquin, P., 1974], p. 23.
[6] [Franquin, P., 1974], p. 23.

En fait, comme le précise de Reffye, ce modèle algébrique, purement mathématique car non fondé sur la supposition de propriétés physiques ou chimiques, convient surtout pour le cotonnier, c'est-à-dire pour un seul modèle architectural, le « modèle de Petit » au sens de Hallé et Oldeman[1]. De plus, faisant abstraction de l'architecture, il ne prend en compte que la croissance et il ne peut donc servir à résoudre les subtils problèmes de variabilité dans la ramification et dans la fructification tels que ceux que de Reffye avait déjà eu à traiter sur une plante comme le caféier. Ce genre de modèles purement mathématiques et descriptifs, ostensiblement choisis pour leur calculabilité dans une axiomatique bien fixée, mais toujours au fond inspirés de la phyllotaxie mathématique originelle, ne peuvent donc faire l'affaire : ils ne seront pas opérationnels.

Limites de la modélisation théorique logiciste

Après cette critique à la fois ciblée et générale des modèles théoriques physicalistes et des modèles théoriques mathématiques dans les problématiques de modélisation de l'architecture végétale, de Reffye évoque avec plus d'intérêt ce qu'il appelle l'« école de Lindenmayer » dans laquelle il range bien entendu les travaux de Frijters et de Lück. Selon lui, cette école « essaie de comprendre d'une façon générale la morphogenèse des êtres biologiques à partir d'une logique interne ou langage de développement »[2]. Notons bien que c'est ici le verbe « comprendre » que de Reffye emploie de préférence à celui d'« expliquer » dont nous avons vu qu'il valait selon lui pour les modèles théoriques physicalistes. Même s'il ne justifie pas davantage cette différence terminologique, il nous est possible de voir dans ce choix la perception qu'a de Reffye des trois suggestions de l'époque en matière de modélisation et desquelles il va se distinguer : alors que le modèle purement mathématique décrit, alors que le modèle théorique physicaliste promet une « explication », c'est-à-dire un dépliage, un déploiement du déroulement du phénomène en son processus physique, une explicitation de sa manière de procéder, le modèle théorique logiciste promet, pour sa part, une « compréhension », c'est-à-dire le déploiement et l'explicitation des raisons du phénomène en ses choix, en ses décisions et ses « contrôles »[3], ces raisons étant directement et uniquement formalisables en des règles linguistiques c'est-à-dire logiques ou « cybernétiques » pour employer le terme de de Reffye lui-même.

Dans le troisième type de modélisation, il est ainsi fait abstraction des propriétés physiques du substrat pour ne se concentrer que sur les propriétés logiques qui en résultent. C'est donc bien une modélisation théorique à interpréter en un sens non physicaliste et plutôt à l'image d'une série de décisions prises par un psychisme humain. Un indice toutefois montre que de Reffye ne semble bien sûr pas s'appuyer aussi clairement que l'on voudrait le croire sur l'opposition, discutée en son temps par le philosophe allemand Wilhelm Dilthey (1833-1911), entre « expliquer » et « comprendre »[4]. Il apparaît dans cette phrase : « L'application des principes de la cybernétique

[1] [Reffye (de), Ph., 1979], p. 10.
[2] [Reffye (de), Ph., 1979], p. 9.
[3] [Reffye (de), Ph., 1979], p. 10.
[4] Voir [Dilthey, W., 1924, 1947], p. 148 : « les sciences morales [*Geistesswissenschaften*] se distinguent tout d'abord des sciences de la nature en ce que celles-ci ont pour objet des faits qui se présentent à la conscience comme des phénomènes donnés isolément et de l'extérieur, tandis qu'ils se présentent à celles-là de l'intérieur, comme une réalité et un ensemble vivant *originaliter*. » Voir également la présentation que fait Aron des thèses de Dilthey *in* [Aron, R., 1948], p. 49 : « La science du passé humain [l'histoire] bénéficie d'un privilège qui lui appartient à elle seule, elle s'attache à des êtres qui ont pensé et dont elle veut repenser la vie ou la conduite. Or il y a lieu de distinguer entre la *compréhension*, qui tend à la mise au jour d'une relation immanente au réel, et l'*explication* du monde inorganique ou organique […] Dilthey avait formulé l'opposition devenue classique en Allemagne : 'nous expliquons la nature et nous comprenons l'homme'. La structure est interne aux phénomènes psychiques, nous n'avons qu'à la dégager. Au contraire, nous reconstruisons les phénomènes physiques à partir des éléments dont la composition vient de l'ensemble

au développement végétal est assuré d'un bon avenir, grâce à son côté explicatif des phénomènes de croissance. »[1] De Reffye emploie donc aussi le terme « explicatif » pour décrire ce que font ces « modèles cybernétiques ». Ce que nous pouvons en fait inférer de cette indécision terminologique, c'est qu'il s'inscrit ici plus sûrement dans la brèche que vient d'ouvrir alors la génétique et surtout la biologie moléculaire dans les conceptions traditionnelles des règles du vivant, avec la notion de « logique du vivant » et surtout avec celle de « téléonomie », popularisées par Jacob et Monod en 1970[2]. Ce terme de téléonomie avait antérieurement été créé par Ernst Mayr, en 1961, dans un article de la revue *Science* : il s'agissait de désigner par là une « finalité mécanique non intentionnelle »[3] pour échapper à l'écueil du finalisme. Monod revendique ce terme pour ne pas avoir à utiliser celui de téléologie : il y a une règle (*nomos*) finalisée (*telos*) mais sans qu'une raison (*logos*) ait présidé à son apparition. La finalité de la morphogenèse, sa normativité devient alors « explicable » sans nécessité que la « compréhension » y intervienne, cette dernière pratique étant toujours suspectée de faire intervenir une raison d'être anthropomorphe valant pour quelque dieu ou pour quelque âme conceptrice et créatrice[4]. Le concept de « téléonomie » impose de penser une logique normative du vivant mais sans que cette logique ait eu une raison pour la concevoir au préalable. Le phénomène de morphogenèse programmée n'est le résultat ni du discours ni du choix rationnel d'aucun créateur. C'est un programme sans programmeur. Il est le résultat d'un « assemblage »[5] spontané analogue à celui que l'on voit dans la croissance des cristaux. Dans le cas de la constitution du bactériophage T4, par exemple, cela se confirme, car « il y a 'apparition' d'ordre, différenciation structurale, acquisition de fonctions à partir d'un mélange désordonné de molécules individuellement dépourvues de toute activité, de toute propriété fonctionnelle intrinsèque autre que de reconnaître les partenaires avec lesquels elles vont constituer la structure »[6]. Et Monod pense, en 1970, que l'on est d'ores et déjà en droit d'extrapoler ces observations à « l'épigenèse des structures macroscopiques (tissus, organes, membres, etc.) »[7].

Cependant, dans ces modélisations logicistes d'inspiration passablement anthropomorphe, il s'agit encore et toujours de théorie pour de Reffye. Cela signifie pour lui que l'on ne part pas du phénomène observé mais que l'on part plutôt d'un « modèle logique » élaboré *a priori* et confronté seulement par la suite à des « réalisations biologiques censées fonctionner selon des processus analogues »[8]. Qu'elle vise une compréhension ou une explication par des finalités non intentionnelles, cette approche cybernétique et logiciste se penche toujours sur un cas général et,

---

psychique. La réalité a un caractère total ici, atomique là. » Ajoutons que Dilthey, dans le cadre d'une problématique néo-kantienne (recherche des conditions de possibilité d'une existence et d'une connaissance historiques), voulait ainsi montrer le caractère second de l'explication par rapport à la compréhension. Voir l'exposé de son projet *in* [Dilthey, W., 1883, 1942], pp. 1-7.

[1] [Reffye (de), Ph., 1979], p. 10. C'est nous qui soulignons.

[2] [Jacob, F, 1970, 1976] et surtout [Monod, J., 1970a], chapitre 4 : « Cybernétique microscopique » et chapitre 5 : « Ontogenèse moléculaire ». Dans ce dernier chapitre, Monod précise la nature des processus de « constitution spontanée d'ordre » (*ibid.*, p. 114) dans l'ontogenèse. Il écrit : « Selon la conception exposée dans ce chapitre comme dans les deux précédents, toutes les performances et toutes les structures téléonomiques des êtres vivants sont au moins en principe, analysables en ces termes [en termes de propriétés associatives stéréospécifiques des protéines]. »

[3] Article et passage cités par [Vergnioux, A., 2003], p. 61.

[4] Monod rapporte en fait cette attitude à ce qu'il appelle un « animisme » : « La démarche essentielle de l'animisme (tel que j'entends le définir ici) consiste en une projection dans la nature inanimée de la conscience qu'a l'homme du fonctionnement intensément téléonomique de son propre système nerveux central. C'est, en d'autres termes, l'hypothèse que les phénomènes naturels peuvent et doivent s'expliquer en définitive de la même manière, par les mêmes 'lois' que l'activité humaine subjective, consciente et projective », [Monod, J., 1970a], p. 49.

[5] [Monod, J., 1970a], p. 116.

[6] [Monod, J., 1970a], p. 116.

[7] [Monod, J., 1970a], p. 117.

[8] [Reffye (de), Ph., 1979], p. 10.

de ce fait, elle abstrait. Finalement, ce que de Reffye voit de réellement novateur dans l'approche de l'école de Lindenmayer est plutôt cette qualité dont nous avons montré que Lindenmayer lui-même le considérait au départ comme secondaire : la capacité de ce formalisme à se prêter facilement et directement à des représentations graphiques sous forme de dessins réalistes sur ordinateurs[1] : la comparaison avec la réalité en est facilitée. Cette modélisation présente également l'avantage de pouvoir prendre en compte les délais variables dans la croissance des rameaux (ramification proleptique ou sylleptique). Au niveau des échéances et des rythmes des événements, elle est donc plus souple que la modélisation physicaliste. En tant que modélisation de la mise en place de la morphologie par la morphogenèse, il s'agit d'une modélisation dynamique qui est capable de rendre compte de manière temporelle d'une séquence d'événements différenciés, séquence de modélisation qui se manifeste elle aussi comme temporelle dans la réalité. C'est en quoi on peut dire que ces modèles logicistes simulent : ils rendent compte historiquement de l'historicité effective du phénomène.

Cependant, et c'est là un problème majeur, les premiers systèmes proposés par l'école de Lindenmayer sont « certains » : du fait que l'on s'impose de les fonder sur une axiomatique récursive rigoureuse, ils modélisent les processus de ramification comme s'ils étaient déterministes. Ce qui n'est manifestement pas le cas au vu des observations de terrain, en ce qui concerne l'organogenèse. Il n'y a donc pas de possibilité de rendre compte de la variabilité phénotypique de l'architecture. De Reffye rappelle ici la grande pertinence de la notion de « phénotype statistique »[2] au sens des botanistes comme Hallé et Oldeman. Or, c'est précisément de cette variabilité dont de Reffye voulait prioritairement rendre compte dès 1977 dans sa simulation intégrale de l'architecture et de la croissance du caféier, cela d'abord afin d'affiner encore les prévisions de récolte et ensuite (pour la thèse d'Etat) afin de tendre vers un plus grand réalisme botanique.

Contre l'esprit analytique de la biométrie

En ce sens, attentif à la complexité des données de terrain, de Reffye se sent donc plus proche de l'esprit des biométriciens. Nous allons voir pourtant que, de façon décisive, il ne se réclame pas non plus directement de cette approche. Certes, l'avantage indéniable de la modélisation biométrique et statistique pour de Reffye est qu'elle ne traite plus la plante comme un « objet théorique ». Elle la traite comme un objet « individualisé et étudié dans sa morphologie propre »[3]. En phase avec les observations de terrain dans leur richesse, la modélisation statistique permet une conservation de la variabilité du matériau mesuré. De Reffye se réclame alors de l'article de Legay de 1971 qui porte sur l'architecture du gui. Souvenons-nous que dans ce travail, Legay discute de la valeur du modèle du flux de sève de Rashevsky[4]. Legay essaie de généraliser ce modèle en l'appliquant à tous les axes ramifiés des ordres 1 à n. Pour le valider, il a recours à de nombreuses mesures expérimentales, parmi lesquelles figurent la longueur, le diamètre et le nombre de ramification des rameaux de gui. Il pratique donc une approche de type biométrique : il présente les mesures sous forme de tableaux et les interprète en termes de statistique. Peu satisfait par la première forme du modèle de Rashevsky généralisé, Legay en propose une autre.

[1] « L'implication graphique de cette formule [de Frijters et Lindenmayer] est réalisée par une ordinateur. Ils aboutissent à des formes assez évocatrices de branchements », [Reffye (de), Ph., 1979], p. 9.
[2] [Reffye (de), Ph., 1979], p. 9.
[3] [Reffye (de), Ph., 1979], p. 9.
[4] [Legay, J.-M., 1971], p. 387.

Ce deuxième modèle lui est suggéré par les valeurs des mesures présentées dans ses tableaux. Quand on lit de près ces tableaux, il apparaît que, davantage que la section des rameaux, c'est leur volume qui se maintient approximativement constant. Or, le volume est intéressant pour Legay car il exprime une quantité de matière végétale alors que des rapports entre sections d'axes et de rameaux restaient purement géométriques. Le nouveau modèle se présente donc comme également explicatif au niveau physiologique et pas seulement comme descriptif ou explicatif au niveau physique. Legay en conclut que l'hypothèse sous-jacente à ce nouveau modèle serait que « la quantité de matière vivante qu'un organisme comme le gui est capable de synthétiser dans un temps donné [ici une année] est approximativement une constante »[1]. Pour lui, il est donc clair que ce deuxième modèle s'appuie sur la physiologie de la cellule. En même temps qu'il donne une loi approchée de la ramification, l'hypothèse qu'il comporte explique de façon intuitive (par la conservation de la productivité végétale) sa forme mathématique. Ainsi, ce modèle permet de passer de la constatation d'une morphologie à l'interprétation d'une physiologie, c'est-à-dire à une interprétation des processus physiologiques de croissance qui y conduisent[2]. Il plaide pour la distinction entre le niveau métabolique de l'organisme et le niveau physiologique cellulaire au profit d'une approche que nous avions dite « populationnelle ». Or, souvenons-nous que Legay termine son article par une discussion générale sur l'enseignement de ce type d'étude. Il y relativise le rôle du modèle car, pour lui, cela n'a pas de sens de se demander si le modèle de Rashevsky ou le sien est le meilleur. Les modèles servent à dévoiler une partie de la réalité, à mettre en évidence des « faits nouveaux ». Ce sont des instruments de recherche et de découverte, selon lui. Mais il ne peuvent aucunement se substituer à la réalité et c'est pourquoi aucun modèle ne peut dans l'absolu être dit « meilleur » qu'un autre. Legay s'appuie ainsi sur cette étude de l'architecture du gui pour affirmer qu'aucun modèle ne « peut décrire la réalité biologique dans toute sa complexité »[3]. Quels qu'ils soient, les modèles ne sont que des outils, c'est-à-dire des « instruments finalisés »[4]. Ils sont *a priori* orientés vers la détection et l'expression d'un seul aspect de la réalité : dans notre cas, soit une lecture métabolique au niveau organique, soit une lecture physiologique et cellulaire de la morphogenèse végétale. Il faudrait ainsi renoncer au projet de concevoir un modèle général de la ramification.

Or, il est très instructif de mettre en évidence l'interprétation que de Reffye fait de ce travail précis dans sa thèse de 1979. Elle révèle une grande distorsion, très symptomatique, en ce qui concerne l'enseignement épistémologique que l'on doit en tirer. Dans un premier temps en effet, il loue le travail de Legay pour cette approche empirique et inductive qui vise à recueillir sur la plante elle-même une architecture distincte. C'est bien cette méthode que de Reffye a également mise en œuvre. Selon lui, et c'est là encore une confirmation de l'importance de la botanique tropicale inspirant tout son travail, c'est la forme très spécifique du gui qui a incité Legay à effectuer des séries de mesures sur la plante elle-même. C'est cette architecture particulière qui l'a incité à avoir un regard neuf, sans prévention théorique, sur l'architecture végétale en général. Le gui se prête certes particulièrement bien aux mesures, comme le constatait déjà Legay, mais surtout sa forme architecturale est peu répandue et impose la conception d'une approche sans *a priori* réducteur. De Reffye admet ainsi que l'espèce végétale étudiée a la vertu d'orienter le modélisateur vers une approche plutôt que vers une autre. Il conçoit par là le fait que le caféier ait joué le même rôle à son égard.

---

[1] [Legay, J.-M., 1971], p. 394.
[2] [Legay, J.-M., 1971], p. 399.
[3] [Legay, J.-M., 1971], p. 401.
[4] [Legay, J.-M., 1971], p. 401.

Toutefois, dans un deuxième temps, de Reffye ne fait pas sienne cette idée que les modèles ne seraient que des « instruments finalisés ». Nous allons voir qu'il interprète en un tout autre sens que son auteur les résultats de l'article. Cela est d'autant plus surprenant que ces idées sont exprimées dans un paragraphe où il tient pourtant à manifester l'intérêt de cette étude. C'est qu'il ne retient des derniers mots de l'auteur que la critique qu'il fait des *modèles proposés* et non la critique de la *notion de modèle en général*. Avec Legay, de Reffye admet sans réserve que les modèles inspirés de Rashevsky sont insuffisants pour décrire la complexité du réel. Mais il refuse d'attribuer ce défaut à l'approche par modèles en général. Il se permet ainsi un contre-sens, sans doute volontaire, qui s'avère très révélateur pour nous lorsqu'il rend compte de la conclusion de Legay : « L'auteur conclut à juste titre qu'une *simple loi* comme celle de Rashevsky ne peut appréhender 'les innombrables mécanismes de la ramification' qui nous apparaissent sous leur bilan global. »[1] Autrement dit, c'est la trop grande simplicité de la loi de Rashevsky qui est à incriminer pour de Reffye, alors que, pour Legay, c'est l'approche par modèle mathématique global qui est de toute façon sujette à caution, parce qu'elle est toujours par elle-même simplifiante. Ce que sous-entend clairement de Reffye, à l'encontre de l'opinion du biométricien Legay, c'est que rien n'interdit à terme d'affiner le modèle mais que de toute façon la modélisation de Rashevsky à elle seule est insuffisante. L'approche par modèles n'en est pas pour autant relativisée. Devant les mêmes résultats, les conclusions sont donc diamétralement opposées. De Reffye tire de cet article une conclusion épistémologique inverse de celle que tirait Legay.

On peut en fait comprendre pourquoi. Lorsqu'il écrit ces lignes, en 1979, de Reffye a déjà démontré la faisabilité d'un outil universel de simulation fine des plantes, sur la base de son approche par l'histoire des méristèmes et en vertu de la classification de Hallé et Oldeman. Il dispose déjà de son logiciel en HPL. Il a ainsi beau jeu de contredire à mots couverts l'article de 1971 et d'en infléchir la conclusion en sa faveur. Au regard de l'histoire des idées, il faut donc bien sûr considérer cette contradiction avec prudence : elle n'est pas le fruit d'une lucidité précoce et programmatique qui se révèlerait en effet fort peu commune pour l'époque. Mais, malgré sa formulation après coup, et de par son caractère conscient et approfondi, elle a le mérite de nous révéler clairement la nature des débats théoriques et méthodologiques sur le statut des modèles de croissance. Car on ne peut pas simplement croire que de Reffye s'est efforcé d'affirmer brutalement et sciemment, dès le début de ses recherches, le contraire de ce que pensaient alors la plupart de ses collègues biométriciens de Lyon puisqu'il n'a eu qu'une connaissance tardive de ces positions méthodologiques et épistémologiques. Il s'agit bien d'une sorte de rationalisation ou de légitimation *a posteriori*. En fait, nous avons là plutôt une confirmation de la totale indépendance d'esprit de de Reffye à l'égard de cette épistémologie des modèles qui s'était progressivement constituée en métropole au début des années 1970. Ce n'est pas une des moindres conséquences de son relatif isolement : pendant toute sa période africaine, de Reffye est sans aucun contact avec les agronomes modélisateurs de l'INRA ou de la DGRST. En conséquence, il ne voit pas de difficulté à se donner un modèle global (fractionné et de simulation) qui tende le plus possible à rendre compte visuellement et dans le détail de l'architecture végétale. N'oublions pas d'ailleurs que, fasciné par la réussite de la physique mathématique, il est toujours en recherche des « lois de la nature » mais qu'il pense qu'il faut en passer pour cela à une attention très fine à la variabilité et à la complexité des phénomènes naturels. C'est parce que de Reffye développe ses simulations *sur le terrain*, aux côtés des expérimentations agronomiques, donc en compétition directe avec elles, qu'il a le souci de la réplication botanique fidèle.

[1] [Reffye (de), Ph., 1979], p. 9. C'est nous qui soulignons.

Contrairement à Legay, il relègue donc au second plan l'explication physiologique ou biologique. L'horizon dans lequel les simulations de de Reffye prennent sens est avant tout de nature opératoire et non cognitif : son usage de l'ordinateur est étroitement associé au développement de *simulations sur le terrain* et qui viennent d'abord en complément des apports empiriques du terrain.

À bien y regarder, l'article de Legay n'a pourtant pas été sans quelque influence tardive sur les formulations de de Reffye, même si elle a été mineure. L'influence de cet article a pu jouer en quelque sorte *a contrario*. C'est comme malgré lui que Legay a pu conduire à une conclusion opposée à l'enseignement épistémologique qu'il voulait tirer de son analyse du gui. C'est en fait le seul mode de présentation des résultats, tel qu'il fut adopté par Legay, qui a confirmé une fois de plus, aux yeux de de Reffye, mais après coup, l'importance de l'approche *stochastique et synthétique* de la croissance des plantes. Cet article aurait donc stimulé une vision *probabiliste* des lois de croissance des végétaux. Et c'est là l'important. De Reffye écrit ainsi :

« Bien que l'auteur [Legay] n'ait pas donné d'interprétation probabiliste aux distributions observées, son travail contient toute l'information nécessaire pour simuler une population statistique de gui d'un ordre donné. »[1]

Alors que chez Legay, fidèle en cela à l'esprit de Teissier, ces tableaux n'avaient pour fonction que de nous faire approcher du modèle déterministe le plus pertinent, pour de Reffye, ils peuvent et doivent servir de sources de données pour la simulation stochastique. Legay ainsi ne traque dans ces tableaux que les valeurs moyennes : autrement dit, il assume dès le début le fait que son modèle approché ne sera vrai qu'en moyenne. Or, pourquoi ne considère-t-il que les moyennes si ce n'est parce qu'au fond, il attend toujours du modèle qu'il apporte avec lui une explication physiologique, explication que l'on puisse se représenter simplement en imagination ? Le modèle doit toujours témoigner d'une certaine explication des phénomènes cellulaires, même si c'est seulement de façon très approchée. C'est en cela qu'il doit servir d'instrument de découverte, d'« instrument *intellectuel* de recherche ». Ses remarques sur l'explication par la physiologie cellulaire et sur la crédibilité du nouveau modèle qui en découle l'attestent. Comment comprendre sinon cette divergence de lecture des mêmes tableaux de données ?

Pourquoi de Reffye ne tient-il pas le même raisonnement ? C'est parce que son objectif est essentiellement agronomique et parce qu'il sait déjà, depuis ses premiers travaux en Afrique sur le caféier, qu'il ne peut et qu'il ne doit pas s'en tenir aux comportements architecturaux moyens. Ainsi, il aperçoit dans ces distributions le moyen de remonter aux lois probabilistes qui les conditionnent. C'est à cette variabilité que de Reffye veut faire un sort, mais d'une manière fondamentalement différente de celle adoptée par la biométrie conventionnelle. C'est parce qu'il vise avant tout à développer un outil rapidement efficace sur le terrain qu'il oriente son modèle mathématique vers la simulation de la croissance et non vers l'explication à l'échelle physiologique des processus en cause. C'est parce qu'en tant qu'agronome, de Reffye a affaire à des individus qu'il se doit de conserver toute l'information qu'il possède, afin d'orienter une action sur le terrain[2].

L'influence principale de l'étude de Legay réside donc tout au plus ici dans la façon qu'il a eu de présenter des données chiffrées concernant la ramification d'une espèce à l'architecture peu conventionnelle. Cette présentation de la ramification sous forme de fréquences en fonction de

[1] [Reffye (de), Ph., 1979], p. 9.
[2] « L'objet du présent travail est d'aborder l'architecture sur un plan numérique en tenant compte au maximum des données botaniques de la répartition et du fonctionnement des bourgeons d'une plante donnée », [Reffye (de), Ph., 1979], p. 15.

l'ordre a suggéré à de Reffye de *conserver toute l'information* sous forme d'une loi probabiliste. Là où il y a rupture avec l'approche de Legay, c'est dans l'usage des données statistiques : de Reffye, comme à son habitude depuis 1975 va remonter aux lois probabilistes pour les faire simuler sur ordinateur. Il ne s'en tiendra pas à la seule considération des moments de ces lois, c'est-à-dire au seul rôle de *condensation de l'information* que R. A. Fisher voulait voir tenir au modèle statistique et informationnel.

La plante conçue comme population de méristèmes

C'est donc contre l'idée que l'on pourrait à première vue représenter la complexité d'une plante en croissance par la modélisation mathématique fonctionnelle[1] d'un comportement moyen, et ce même en vue d'un usage particulier clairement ciblé[2] (comme l'optimisation d'un rendement), que de Reffye décide d'adopter une approche populationnelle, probabiliste et synthétique. Comme le fait le « démographe des plantes » James White en cette même année 1979, de Reffye considère la plante au niveau des méristèmes : il la conçoit de manière décisive comme une population de méristèmes. Mais cette approche populationnelle ne se contentera pas des comportements moyens. Elle se focalisera sur les comportements individualisés des différents membres qui composent les populations. Elle se développera à l'échelle de ces individus que sont les méristèmes. Car c'est le comportement de ces méristèmes pris un à un qui seul semble pouvoir être mathématiquement modélisé selon une loi de probabilité dont la structure et les paramètres varient, il est vrai, en fonction de l'ordre de ramification. C'est à cette échelle et sur ces organes seulement que l'on retombe sur un comportement suffisamment homogène et donc susceptible d'une formalisation à la fois locale et intégrable.

En conformité avec l'approche qu'il avait déjà systématiquement mise en œuvre dans ses premiers modèles de caféiers comme dans les modèles de simulation stochastique de pollinisation de cacaoyers, de Reffye part alors explicitement du principe que l'on peut fractionner les différents aspects du phénomène global de mise en place de l'architecture de toute plante en général, de manière à les recombiner ensuite de manière très intriquée, étape par étape, dans l'infrastructure du programme informatique[3]. Ces aspects complémentaires sont au nombre de trois : topologique (arrangement mutuel des méristèmes, des entre-nœuds et des organes), géométrique (tailles des entre-nœuds, métrique de la croissance) et mécanique (phénomènes de flambage, de verse ou de casse des tiges). Or il est à noter que l'essentiel du travail approfondi de la thèse réside dans l'analyse du premier aspect, celui qui concerne la modélisation stochastique de la topologie fine d'un arbre réel du point de vue de l'histoire particulière de ses méristèmes. Alors que cet aspect topologique du travail argumentatif et mathématique de de Reffye occupe environ 115 pages du mémoire de la thèse de 1979 sur les 130 pages qui sont au total dédiées à l'argumentation biologique et mathématique, seules 10 pages suffisent à expliciter, à la fin, l'introduction des modules de traitement de la géométrie et de la mécanique des plantes simulées. Ici nous rapporterons donc d'abord et surtout ce qui a été décisif et réellement novateur dans la

[1] Au sens de la « fonction » mathématique.
[2] Ce qui serait sinon retomber encore dans le pragmatisme perspectiviste de l'épistémologie des modélisateurs français issus de la biométrie.
[3] « Si donc on *allie* les processus aléatoires de croissance, les caractéristiques géométriques et mécaniques d'un arbre, rien ne s'oppose à ce qu'on puisse faire exécuter le tracé d'une projection à n'importe quel âge, des trois dimensions, *aussi fidèle que possible*, à l'aide d'un traceur de courbe relié à un calculateur. La connaissance des durées de vie des feuilles et de la sexualité doit aussi permettre de *partitionner* correctement la plante, et d'en calculer les grandes caractéristiques (nombre de nœuds fructifères, etc.) », [Reffye (de), Ph., 1979], p. 12. C'est nous qui soulignons.

formulation, la légitimation et le calibrage du modèle stochastique pour la topologie de l'architecture de toute plante. Là est l'apport principal du travail de 1979.

Ce travail sur l'aspect topologique est lui-même effectué en 3 temps : 1- de Reffye introduit d'abord un formalisme probabiliste général pour modéliser l'activité des méristèmes du point de vue de leur *croissance* ; 2- par la suite, il ajoute une prise en compte de la *mortalité* des méristèmes, phénomène qui avait été ignoré ou occulté par la plupart des modélisations antérieures de l'architecture, on s'en souvient ; 3- enfin, il met en œuvre une « théorie de la mesure de la ramification »[1] dans laquelle une forme générale pour la loi de probabilité de *ramification* est proposée. Croissance, mortalité et ramification sont ainsi considérées comme les trois événements cardinaux qui peuvent à tour de rôle affecter localement la vie d'un méristème et modifier globalement la topologie de la plante.

Modélisation probabiliste de l'activité de croissance des méristèmes

Dans l'approche topologique, le temps et l'espace sont discrétisés. Il faut donc se donner une unité de mesure ayant une signification biologique repérable sur le terrain. Il s'agira de l'entre-nœud[2]. Ainsi, « la croissance d'un axe se fait par entre-nœuds successifs »[3]. De Reffye reprend alors à sa thèse de 1975 la supposition selon laquelle une loi de probabilité serait un formalisme élémentaire idéal car elle permettrait de capter à la fois la variabilité inter-clonale et la variabilité intra-clonale du point de vue architectural :

« *Si on prend par exemple le cas du caféier, et que l'on observe l'architecture d'une ligne de plantation clonale, on saisira à la fois la ressemblance entre deux arbres du même clone en même temps que la différence. Leur ressemblance est due évidemment à leur identité génétique et leur différence aux nombreuses perturbations locales à caractère aléatoire. Si l'on compare ce clone au clone de la ligne suivante, on constate que leur différence architecturale est essentiellement génétique. La* conséquence logique *de cette observation est d'attribuer une probabilité de fonctionnement identique aux bourgeons d'un même clone et une probabilité différente à ceux du clone voisin. Ce concept* [de probabilité] *rend compte des ressemblances et des différences inter et intra clonales.* »[4]

Une grande partie du premier chapitre de la thèse de 1979 consiste donc à trouver une formulation mathématique qui permette de remonter des mesures statistiques de terrain aux processus stochastiques qui donnent naissance aux premiers entre-nœuds d'une plante. Pour ce faire, le matériel choisi au départ sera constitué de jeunes boutures non encore affectées par la mortalité méristématique. Cela permet de formuler et de calibrer la probabilité de l'*activité* de croissance des bourgeons, c'est-à-dire la probabilité pour un méristème de faire ou non un entre-nœud. En faisant l'approximation de la somme d'une série avec une intégrale, de Reffye peut en effet procéder à un calcul d'inversion permettant de passer de la distribution observée des tailles

[1] [Reffye (de), Ph., 1979], p. 4.
[2] [Reffye (de), Ph., 1979], p. 15.
[3] [Reffye (de), Ph., 1979], p. 15.
[4] [Reffye (de), Ph., 1979], p. 15. C'est nous qui soulignons. Le caractère rigoureusement « logique » de la conséquence en question est discutable dans la mesure où il s'agit plutôt d'une suggestion inductive faite à partir d'observations sur le terrain. En fait, c'est bien à ce niveau là, à savoir celui du bourgeon ou méristème, que la modélisation statistique traditionnelle, c'est-à-dire purement informationnelle ou phénoménologique, s'insère. Son usage en sera par la suite synthétique et non analytique. Et c'est là que résidera essentiellement la nouveauté.

des tiges à la loi probabiliste d'activité des méristèmes[1]. Puisque la distribution en probabilité de la taille des tiges résulte de la réitération de l'activité du méristème, elle se fait en conséquence selon une loi binomiale simple dont l'un des paramètres est la probabilité d'activité elle-même. Avec la formule du binôme valant pour cette loi binomiale, on peut donc écrire explicitement et de manière analytique la probabilité de tirer une tige de taille donnée en fonction de cette taille et de la probabilité d'activité du méristème[2].

Afin de vérifier la formulation de cette loi probabiliste et ses paramètres calibrés, de Reffye écrit un premier sous-programme transitoire en HPL. Ce programme utilise la loi probabiliste de manière synthétique et il « simule »[3] ainsi la croissance d'une population de bourgeons à partir de la valeur de la probabilité calibrée sur les données. Ce sous-programme recourt aux méthodes de tirage de nombres aléatoires de type Monte-Carlo dont nous savons que de Reffye les utilise et les maîtrise depuis 1974. À ce sujet, de Reffye, affirme à plusieurs reprises qu'il s'inspire des méthodes issues de la recherche opérationnelle (toujours notamment à partir du livre de Naylor et Balintfy, 1966) et que ces méthodes sont encore peu usitées en modélisation appliquée à la biologie[4]. Il sait donc que c'est là que figure, entre autres, une des nouveautés de sa proposition par rapport aux autres pratiques de modélisation en biologie.

Il est à noter que de Reffye ne demeure pas totalement satisfait de ce plaquage des méthodes de modélisation probabiliste. Il reste même encore assez embarrassé de ne s'être livré à ces échelles-là qu'à ce qui pourrait n'être conçu par d'autres que comme une modélisation descriptive. C'est pourquoi il tâchera, en conclusion de sa thèse, de justifier sur un plan général l'introduction de lois probabilistes en biologie au moyen d'un argument typiquement mécaniste qui, pour nous, s'avère très révélateur. Il ne le reproduira plus par la suite mais il nous en dit long sur l'esprit dans lequel il s'autorise alors à recourir aux probabilités :

« Dans la plupart des systèmes physiques, la variabilité des paramètres relève directement de l'imprécision sur les mesures. Il n'en est pas de même dans les systèmes biologiques où à toute variable on est souvent forcé d'associer une loi de distribution expérimentale, qu'on résume assez grossièrement par ses deux premiers moments, moyenne et variance. Cette différence peut sans doute s'expliquer par le fait que l'information circule lentement dans un être biologique sous forme de molécules labiles et donc doublement vulnérables. Ce qui fait que le processus biologique dépend dans son évolution de la probabilité de la transmission de l'information. »[5]

Dans ce passage, de Reffye fait d'abord allusion aux méthodes d'analyse de variance de la biométrie pour les opposer aux origines du calcul des incertitudes dans les sciences exactes (notamment en astronomie, comme on peut le supposer). Pour lui, la légitimité de la biométrie vient du fait qu'il y a une sorte d'émergence d'un hasard, à une certaine échelle, dans certains phénomènes biologiques élémentaires pour des raisons qu'il conçoit de manière purement mécaniste : cette sorte de hasard « objectif » émergent serait due à la différence des *vitesses* de certaines molécules informatives. Or, nous allons voir que c'est parce qu'il peut se représenter préalablement un tel scénario mécaniste d'émergence du hasard dans l'activité de croissance qu'il s'autorise finalement à employer les processus stochastiques, en rompant ce faisant avec

[1] [Reffye (de), Ph., 1979], p. 19.
[2] [Reffye (de), Ph., 1979], p. 21.
[3] [Reffye (de), Ph., 1979], p. 20.
[4] Voir notamment [Reffye (de), Ph., 1979], p. 13.
[5] [Reffye (de), Ph., 1979], p. 170.

l'approche purement analytique ou informationnelle de la biométrie. Il poursuit en effet immédiatement :

« La conséquence logique d'un tel état de fait est de remonter quand cela est possible aux processus stochastiques qui engendrent la loi de distribution expérimentale. Ce faisant, on est à même de mesurer le fonctionnement du système, et de le résoudre numériquement, ce qui peut permettre de remonter aux causes. »[1]

Son interprétation de la biométrie par l'ignorance des causes montre bien qu'il se situe encore dans une vision passablement mécaniste de la biologie, où le modèle d'une science accomplie reste celui de la mécanique et de la physique statistique. Davantage, ce passage nous permet de comprendre que de Reffye attribue à sa simulation le pouvoir de désigner plus proprement les « causes » des architecture rencontrées. Son approche de 1979 reste inspirée par un désir de déceler des causalités ou des lois théoriques à valeur universelle. Même s'il donne aux probabilités une interprétation plus objectiviste que les biométriciens, sa conception du modèle formel s'oppose à celle des positivistes ou fictionnalistes les plus radicaux. Il est remarquable que ce soit dans ce contexte interprétatif qu'il s'autorise à recourir aux processus stochastiques en tant qu'instruments de synthèse et non plus d'analyse et qu'il contribue à développer une forme nouvelle de modélisation.

Si l'on poursuit justement notre analyse de la construction progressive de son modèle, de Reffye nous livre l'organigramme du sous-programme simulant l'activité du méristème. Il le commente de la façon suivante :

« *L'organigramme suivant peut simuler selon la méthode de Monte-Carlo une population de T tiges au hasard, qui auront la même liaison moyenne-variance V = f(x). Il faut toutefois un grand nombre de tiges simulées pour observer une bonne concordance entre les simulations et les observations – en effet les simulations convergent vers la relation V = f(x) suivant la loi des grands nombres. »*[2]

Outre le fait que le sous-modèle testé ne nous est présenté que comme un équivalent statistique, nous comprenons également que ce sous-programme transitoire est utilisé pour une vérification empirique *intermédiaire* de la validité de la loi probabiliste particulière valant pour chaque méristème. Il nous est fondamental de comprendre ici que, comme dans les travaux antérieurs sur la pollinisation du cacaoyer, la validation du modèle informatique fractionné et intégratif commence donc *déjà* à ce niveau là. Ainsi, la validation n'est pas essentiellement ou pas seulement exercée à la fin, c'est-à-dire à l'issue du processus d'intégration des différents sous-modèles. Elle commence déjà au niveau des sous-modèles. La validation n'est pas ou pas seulement informationnelle et globale comme c'est en revanche le cas dans les modèles statistiques compris à un niveau purement phénoménologique. Elle intègre différentes étapes et différents niveaux de validation à des échelles qui, biologiquement, sont diversement signifiantes. Le processus de validation est donc lui-même intriqué et complexe. De par son caractère pluri-échelle, il contribue déjà à manifester l'idée que le modèle informatique est ici davantage conçu comme une réplication du phénomène réel, dans la diversité des expériences que l'on en peut

[1] [Reffye (de), Ph., 1979], p. 170.
[2] [Reffye (de), Ph., 1979], p. 20.

avoir, que comme une simple abstraction informationnelle valant à un seul niveau et selon une seule perspective pragmatique ou opérationnelle précise.

Par la suite, le travail de de Reffye consiste, assez classiquement, à complexifier cette loi probabiliste de l'activité de croissance élémentaire du méristème pour que sa modélisation ne vaille pas uniquement pour les très jeunes plantes et les boutures. Il s'agit notamment de prendre en compte la non stationnarité de cette activité de croissance en fonction de l'ordre de ramification. Souvenons-nous ici que c'est précisément la non prise en compte de cette source de variabilité par les modèles purement géométriques de Hisao Honda qui avait conduit Jack B. Fisher à se détourner finalement des simulations graphiques sur ordinateur. Or, de ce point de vue là, de Reffye va une fois de plus à l'école de la recherche opérationnelle. De façon décisive, il s'installe résolument dans le formalisme des processus stochastiques. Il lui est alors possible de prendre en compte cette non stationnarité, qu'il interprète pour sa part comme un simple *amortissement* de la probabilité de croissance en fonction de l'ordre du méristème sur l'axe considéré : la variabilité des paramètres de la loi de probabilité est ainsi prise en charge et formalisée par le concept bien défini de « processus stochastique »[1]. Rappelons en substance qu'un processus stochastique est conçu d'emblée comme une cascade d'événements gérés eux-mêmes par des lois de probabilités éventuellement différentes. Ces lois de probabilités dépendent donc de leur *situation* dans l'arborescence des événements aléatoires auxquels elles ont elles-mêmes donné lieu. Dès lors, la taille de la tige résultante ne peut plus simplement être calculée comme la somme de N variables aléatoires indépendantes, contrairement au cas initial : mais on peut tout de même formaliser une dépendance entre ces probabilités tout en conservant les moyens de faire des calculs de sommation pour les événements aléatoires successifs qui leur correspondent, c'est-à-dire tout en restant à l'intérieur d'un formalisme homogène. Or, c'est ce formalisme qui, selon de Reffye, permet de prendre en compte l'*évolution du comportement* du méristème en fonction de sa situation dans l'architecture en croissance, c'est-à-dire en fonction de son âge biologique.

Toutefois, tous les processus stochastiques ne sont pas également féconds et manipulables. Cette échappatoire et cette complexification du côté des formalismes de la recherche opérationnelle pourraient donc se révéler stériles à l'usage. En fait, de Reffye se propose tout de suite l'hypothèse simplifiante (qui lui paraît crédible) selon laquelle « l'étape N ne dépend que de l'étape N-1 »[2]. Ce processus stochastique peut ainsi prendre très vite la forme simple d'une « chaîne de Markov »[3]. De Reffye conçoit alors un sous-programme simple permettant de « simuler le fonctionnement d'un bourgeon à accroissements dépendants ». Il nous en fournit l'organigramme. Mais, cette fois-ci, il ne compare pas les résultats de la simulation numérique (toujours conçue selon la méthode de Monte-Carlo) avec les données de terrain mais avec les résultats « théoriques » que l'on trouve par ailleurs pour la moyenne et la variance. Ces résultats, qu'il qualifie de « théoriques », sont calculés directement au moyen de formules analytiques et littérales qui découlent elles-mêmes du passage à une représentation algébrique de la chaîne de Markov et à la matrice de variance-covariance associée[4]. Cette simulation intermédiaire lui sert à comparer et, dit-il, à « voir l'excellente concordance entre la théorie et la simulation »[5]. Les lois de probabilités construites selon ce processus sont donc validées aux yeux de de Reffye.

[1] [Reffye (de), Ph., 1979], p. 18.
[2] [Reffye (de), Ph., 1979], p. 22.
[3] [Reffye (de), Ph., 1979], p. 22.
[4] [Reffye (de), Ph., 1979], p. 23.
[5] [Reffye (de), Ph., 1979], p. 23.

Mais on pourrait là encore se demander pourquoi, si de Reffye dispose des formules littérales permettant d'exprimer directement la variance et la moyenne de la hauteur des tiges, il ne prévoit pas de les employer en lieu et place des simulations pas à pas : le programme en serait simplifié, le calcul moins lourd et plus sûr. Nous pouvons interpréter ce choix de la manière suivante : il s'agit pour lui de penser dès maintenant au programme intégratif où tous les sous-modèles seront assemblés et où de telles formules mathématiques explicites n'auront plus cours à l'échelle globale du fait de l'interaction avec d'autres phénomènes. Il lui faut donc conserver la reproduction réaliste du pas à pas du phénomène dans son historicité même afin d'accueillir au mieux la survenue d'autres phénomènes interférants. La condensation des formules ne peut servir ici à remplacer la simulation. Elle sert plutôt au contraire à valider la simulation dans son aptitude à remplacer, à valoir pour une formulation qui, sinon, serait théorique.

De façon significative, nous pouvons d'ores et déjà faire remarquer que les simulations intermédiaires de de Reffye, au cours de son travail d'explicitation et de légitimation, se trouvent servir à deux types bien différents de validation : *validation empirique* de la simulation par confrontation avec un échantillon de données de terrain qui a été jugé simple *d'un point de vue empirique* (les boutures), *validation théorique* de la simulation par confrontation avec les formules analytiques condensantes dans un cas qui a été jugé simple *d'un point de vue théorique* (c'est-à-dire avec des phénomènes élémentaires désintriqués).

Par la suite, de Reffye peut développer une méthode d'identification directe des paramètres numériques de la simulation qu'il appelle « méthode de résolution de l'architecture par les cimes »[1]. Cette méthode nécessite des hypothèses supplémentaires restreignant la généralité du processus stochastique. Elle n'est donc valable que pour certains types d'architecture, dont le « modèle architectural de Roux » qui correspond justement au caféier. Il faut notamment supposer, dans un premier temps, que les accroissements sont indépendants, c'est-à-dire que l'activité P du bourgeon orthotrope en particulier (c'est-à-dire sa probabilité de croissance) est constante. De Reffye montre que, dans ce cas précis, si l'on se place à K entre-nœuds du sommet de l'arbre et si l'on observe une population d'arbres identiques (clones) et de même âge, la dimension de la tige varie selon une loi binomiale négative de paramètres K et P. Dès lors si, à partir des mesures de terrain, on calcule, entre autres, la longueur moyenne des tiges et la variance des nombres de rameaux, on peut directement calculer, grâce à des formules algébriques simples, l'activité du bourgeon et la dimension de l'arbre. Dans ce cas de figure également, de Reffye peut se livrer à une simulation numérique intermédiaire dont il compare les résultats avec les valeurs exactes données par les formules. Là encore, il compare les valeurs théoriques, et non des observations, avec des valeurs simulées. Cette comparaison confirme la validité de la simulation mais elle offre aussi l'important intérêt de permettre de chiffrer *a priori* la taille minimale de l'échantillon qu'il est nécessaire de mesurer en champ pour être sûr que l'on aura affaire à une bonne estimation des paramètres des lois probabilistes. En l'espèce, la comparaison théorie/simulation indique que l'échantillon devra présenter plus de 200 individus[2]. Par la suite, de Reffye montre que, moyennant une certaine complexification dans les calculs à la main, la méthode peut toujours valoir dans le cas plus réaliste d'une croissance dépendante amortie. Il montre donc sa généralité. La méthode de résolution par les cimes se révèle d'une immense importance pour minimiser le travail de mesure sur le terrain.

Vient alors la phase d'application de ce modèle de simulation numérique au caféier *Robusta*. Ce modèle est encore partiel puisqu'il ne se présente que sous la forme de processus

[1] [Reffye (de), Ph., 1979], p. 27.
[2] [Reffye (de), Ph., 1979], p. 30.

stochastiques. De Reffye montre qu'il est possible d'identifier tous les paramètres de ce modèle au moyen des données recueillies sur le terrain. Pour un même clone de caféier, d'après les tableaux qu'il nous fournit, la corrélation r calculée entre les observations et les valeurs simulées à partir du modèle probabiliste ajusté se révèle toujours très bonne (r>0,96)[1]. Il nous donne également la possibilité de comparer, sur les mêmes graphiques, les histogrammes observés et les histogrammes simulés. On y constate clairement le fort recouvrement des uns par les autres[2]. La *forme* de la distribution statistique simulée est donc elle même correctement simulée, et pas seulement ses premiers moments.

À cette étape-là de la construction du modèle, à côté de la simulation numérique servant à la validation, de Reffye propose de commencer à « voir les implications graphiques » de cette modélisation stochastique de l'activité des bourgeons. Pour ce faire, il recourt à son ordinateur HP et au traceur de courbe qui lui est connecté. Comme la gestion de la géométrie et de la mécanique des branches reste encore à introduire à ce stade-là, le programme dessine uniquement des profils arborescents rectilignes. Ils sont en deux dimensions et représentent le rabattement de toute la plante sur la feuille de papier, c'est-à-dire une projection d'un volume sur un plan. L'intérêt de cette représentation graphique intermédiaire est que l'on peut déjà *observer qualitativement* la différence de port entre divers clones du caféier par exemple. Comme on connaît également le nombre exact d'entre-nœuds pour tous ces arbres simulés, on peut même déjà commencer à expliquer la variation inter-clonale et intra-clonale de la production en cerise, c'est-à-dire, au final, en café. Le lien, déjà connu par ailleurs pour certains clones, entre le rendement et l'allure qualitative de leur architecture telle qu'elle est clairement reproduite sur le traceur de courbes est ainsi vérifié. Autrement dit, le lien entre une appréhension qualitative coutumière et un résultat quantitatif probable est explicité et confirmé par la visualisation automatique du profil calculé. Ainsi, certains clones confirment leur adoption préférentielle d'une forme trapue ou plutôt conique ou encore ogivale[3], etc.

Notons ici que de Reffye qualifie cette reproduction encore très stylisée de « représentation graphique » alors qu'il réserve l'expression de « simulation spatiale » pour désigner ce qui sera le résultat final des modèles intégrés dans l'infrastructure informatique. Significativement, la représentation est encore clairement abstractive et symbolique pour de Reffye alors que la simulation finale sera plus fidèle à la réalité botanique, ne serait-ce que parce qu'elle restituera une véritable gestion de la tridimensionnalité de la plante. Cette « représentation graphique » intermédiaire présente également l'intérêt de marquer les limites du modèle du fait de la non prise en compte de la mortalité des bourgeons lors de la croissance. C'est aussi en cela que l'on a encore affaire à des « profils théoriques ». Ils ne sont pas susceptibles de reproduire la réalité parfaitement. Et ils mettent ainsi en évidence les différents phénomènes biologiques que les autres sous-modèles mathématiques devront prendre en compte :

« *En réalité, plus on progresse du sommet vers la base, plus la mortalité affecte les bourgeons. Ainsi, à 30 étages du sommet, 90% des rameaux sont morts et 50% sont déjà tombés. Ceci dégarnit le caféier et change notamment sa silhouette.* »[4]

[1] [Reffye (de), Ph., 1979], p. 42.
[2] [Reffye (de), Ph., 1979], p. 49.
[3] [Reffye (de), Ph., 1979], p. 52.
[4] [Reffye (de), Ph., 1979], p. 52.

Une modélisation de l'architecture doit en conséquence prendre en compte ce phénomène très important si l'on veut pouvoir évaluer correctement le rendement du caféier dès lors qu'il est très lié à l'architecture globale de l'arbre. C'est ce à quoi de Reffye va s'atteler dans la suite.

Mortalité des méristèmes et ramifications avec retard

Dans un deuxième temps, il s'agit en effet de définir plus finement l'architecture de l'arbre. Pour la prise en compte de ce nouveau phénomène biologique qui lui-même explique, au niveau du méristème, les phénomènes observables d'avortement ou d'élagage naturel de certains rameaux dans l'architecture, de Reffye procède de la même manière que précédemment. Il recourt à des processus stochastiques en définissant une mortalité et une viabilité pour les méristèmes. Il est à remarquer que la viabilité ne coïncide pas avec l'activité. Il lui faut donc procéder à des calculs algébriques de composition de probabilités assez longs pour arriver à exprimer analytiquement l'espérance de la taille d'une tige et sa variance. À ce stade-là, de Reffye réitère sa méthode de validation théorique de la simulation puisqu'il dispose des formules analytiques. Il nous livre ainsi l'organigramme du sous-programme de simulation de la croissance d'un méristème d'activité et de viabilité données. Le programme procède toujours méristème par méristème. Il est conçu pour faire d'abord le test probabiliste (par une méthode de Monte-Carlo) de la viabilité pour le méristème en question ; et si ce test est positif, il fait alors le test probabiliste de l'activité de croissance. C'est ainsi que les deux phénomènes sont aisément intriqués dans le nouveau sous-programme, sans les complications mathématiques des formules analytiques : le traitement de leur intrication peut être séquentiel car le programme simule l'historicité du phénomène complexe au niveau du destin individuel d'un méristème. Il simule un passage du temps pas à pas à cette échelle où précisément l'*intrication* de ces phénomènes biologiques peut être traitée comme une *succession* élémentaire.

De Reffye nous présente alors les valeurs simulées par ce nouveau sous-programme en regard des valeurs qui ont été calculées selon les formules « théoriques » de manière à confirmer la bonne aptitude du sous-programme à simuler numériquement l'avortement ou l'élagage naturel. Il effectue ensuite le calibrage de ce modèle de simulation numérique sur des clones de caféier particulièrement bien mesurés et suivis ; ce qui n'est pas le cas pour tous. Le nombre des mesures nécessaires, ou plutôt le nombre de tiges qu'il faut décompter sur différents arbres d'un même clone s'élève en effet parfois à près de 2000[1]. Il réutilise enfin son module de « représentation graphique » des profils grossiers, en y incorporant le nouveau sous-programme simulant la viabilité intriquée avec l'activité, de manière à évaluer qualitativement la prise en compte du phénomène d'élagage. D'après ses tableaux de mesure et ses valeurs simulées, de Reffye en conclut avec satisfaction qu'« on obtient alors des 'caféiers aléatoires' qui ont le même comportement que celui observé en champ »[2].

Il reste cependant encore un phénomène biologique qui n'est pas pris en compte et qui peut affecter l'architecture de l'arbre à un moment donné de son histoire. Il s'agit de l'éventuelle *dormance* affectant les bourgeons axillaires, autrement dit les bourgeons donnant naissance aux axes latéraux. Un bourgeon axillaire formé lors de la création d'un entre-nœud de la tige peut ne fonctionner que quelque temps plus tard, avec un certain retard. De Reffye introduit alors la notion de « probabilité de fonctionnement ». Dans l'organigramme du nouveau sous-programme valant plus spécifiquement pour les bourgeons axillaires, un test de dormance est donc inséré. Il est fait

[1] [Reffye (de), Ph., 1979], p. 71.
[2] [Reffye (de), Ph., 1979], p. 74.

préalablement au test d'activité. Là encore, on peut comparer valeurs simulées et valeurs théoriques pour une population de rameaux.

Validation et vérification : arbre calculable et arbre non calculable

Cependant, lorsqu'il s'agit de prendre en compte tous ces derniers phénomènes biologiques ainsi que l'effet d'amortissement de l'activité, de Reffye ne parvient plus à calculer et à exprimer analytiquement la taille théorique de la tige et sa variance. Il écrit laconiquement : « Dans le cas général où b(N) [= probabilité de croissance b fonction de la dimension N de l'arbre] n'est pas constant, le problème est plus difficile à résoudre »[1]. Et là s'arrêtent les calculs. En contraste avec le scrupule qui avait été jusqu'à présent le sien lorsqu'il s'agissait de calculer de manière analytique les paramètres des processus stochastiques, de Reffye propose alors de se rabattre sur un ajustement par tâtonnements :

« *Dans ce cas, il est plus facile de procéder à un* ajustement direct empirique *par la méthode de Monte-Carlo, en faisant varier les coefficients de l'activité jusqu'à ce que les histogrammes simulés et observés coïncident d'une façon satisfaisante*. »[2]

Remarquons que cet ajustement est dit « empirique » dans la mesure où l'on fait plusieurs essais avec des paramètres choisis d'abord au hasard et où l'on visualise graphiquement l'allure des différents histogrammes de simulation résultants. On constate donc visuellement la plus ou moins grande concordance entre les histogrammes des phénomènes réellement observés et les histogrammes des simulations. Cette pratique est analogue à la modélisation statistique dite non-paramétrique. C'est donc à l'usage, sur ses performances comparées, que le modèle de simulation est ajusté, dès lors qu'il est devenu trop complexe à cause de l'intrication des divers phénomènes biologiques modélisés. C'est que *le modèle ne peut plus être inversé mathématiquement*. En ce sens, de Reffye en fait bien un usage « direct ». Mais ce dernier reste prudent sur la nature précise de l'obstacle : n'étant pas mathématicien, il reconnaît implicitement qu'il ne s'agit peut-être pas d'une impossibilité mathématique en soi, mais plutôt d'une difficulté mathématique pour lui (« le problème est plus difficile …», « il est plus facile …»). Toujours est-il que se révèle là un autre emploi pour sa simulation : la possibilité de calibrer cette fois-ci *au niveau du phénomène global* les paramètres qui manquent. Mais, du même coup, on perd la sécurité de la validation séparée. En ce sens, nous constatons qu'il arrive un moment où le processus de validation fractionnée pas à pas ne peut plus être poursuivi.

Il est tout à fait révélateur pour nous que de Reffye se soit senti fortement gêné par un tel procédé de dernier recours : c'est qu'à plusieurs reprises, il manifeste une certaine méfiance à l'égard des résultats d'une simulation intégrée. C'est pour cela qu'il prend soin de procéder autant que possible à des validations théoriques, étape par étape, dans la construction progressive de son modèle intégrateur. Cette méfiance de principe se manifeste clairement dans un passage de la thèse dans lequel il revient sur l'approche qui a été initialement la sienne. Il y exprime sa conviction qu'il faut toujours pouvoir disposer d'un « arbre élémentaire » qui présente la particularité d'être entièrement calculable à la main et d'être ainsi susceptible de servir de contrôle à toute la simulation. Ce passage a le mérite de nous faire mieux comprendre le sens de la distinction entre ce que nous avions d'abord appelé validation empirique et validation théorique :

[1] [Reffye (de), Ph., 1979], p. 85.
[2] [Reffye (de), Ph., 1979], p. 85. C'est nous qui soulignons.

« *La vérification du bon fonctionnement des programmes de simulation d'architecture exige de savoir résoudre théoriquement au moins un arbre particulier. Cet arbre sera l''Arbre élémentaire'. Bien que relégué dans un sous chapitre du présent travail, il en est à l'origine. Ce n'est que lorsqu'il a été bien connu et résolu que nous avons tenté l'approche des arbres réels. L'Arbre élémentaire et tous ceux qui en dérivent simplement ont la propriété d'avoir toutes leurs caractéristiques architecturales calculables […] On peut alors facilement rendre compte du bon fonctionnement des simulations en observant la convergence entre les caractéristiques simulées et leurs valeurs théoriques.* »[1]

Ce que nous avions appelé la « validation théorique » recouvre donc en fait la *vérification* du programme : il s'agit de savoir si le programme fait bien ce que l'on prévoit qu'il fasse d'un point de vue formel. C'est la qualité de l'implémentation informatique du modèle mathématique qui est ici testée. Alors que dans le cas de la « validation empirique », il s'agit d'une *validation* proprement dite, à savoir une comparaison entre ce que donne le modèle et la réalité observable. De Reffye ne fait pas cette distinction aussi nettement que le feront plus tard les informaticiens dédiés à la modélisation[2]. Mais il a conscience de l'importance de la vérification du programme au moyen de calculs analytiques poussés le plus loin possible, en parallèle des simulations.

La notion d'« Arbre élémentaire » calculable se trouve remplir une autre fonction importante selon de Reffye, à laquelle il ne veut pas renoncer :

« *Le fait que l'on peut formuler l'arbre montre comment se combinent entre elles les notions d'activité, de viabilité, de ramification, d'axillaires par nœud et de dimension dans l'expression de la structure de l'arbre. Ceci permet de mesurer l'importance relative de chaque notion dans l'architecture, et l'on voit bien que chacune est indispensable pour décrire l'Arbre entièrement, et que l'on ne saurait le ramener, comme nous l'avons dit plus haut, à uniquement* [sic] *des problèmes de ramification.* »[3]

Cette seconde fonction de l'« Arbre élémentaire » est de nature théorique cette fois-ci. C'est-à-dire que, selon de Reffye, c'est seulement grâce à elle que l'on peut encore « mesurer » *intellectuellement*, autrement dit *comprendre*, le poids relatif de chacun des phénomènes biologiques intervenants. De Reffye sous-entend que sans cette notion, la simulation informatique rend définitivement opaque à notre esprit le sens biologique de ses très nombreux calculs souterrains. La notion d'arbre calculable permettrait donc de ne pas être victime de ce voile opaque et elle servirait autant à percer à jour le sens biologique de chacun des phénomènes contribuant à l'architecture globale qu'à contrôler l'implémentation informatique. Elle servirait à nous donner à voir ce qu'il nous faut encore tâcher de comprendre d'un regard de l'esprit ; elle servirait à nous en donner une intuition intellectuelle si l'on peut dire. En se donnant une telle notion, de Reffye admet qu'il peut aussi permettre de penser le phénomène complexe de l'architecture avec les concepts de la biologie et non plus seulement avec ceux de la physique ou des disciplines connexes. Comme il nous le dit en substance à la fin de ce passage, il espère convaincre les biologistes qu'une des retombées d'un tel travail autour d'une simulation de l'architecture peut également leur fournir les moyens d'expliquer et de montrer clairement, grâce à

[1] [Reffye (de), Ph., 1979], p. 114.
[2] Voir par exemple [Hill, D. R. C. et Coquillard, P., 1997].
[3] [Reffye (de), Ph., 1979], p. 114.

des concepts purement biologiques et botaniques cette fois-ci, que l'architecture d'un arbre n'est pas réductible à un réseau hydrographique, ce dont ils sont déjà bien persuadés mais sans qu'ils aient eu jusque là les moyens de proposer une alternative de conceptualisation liée à une modélisation mathématique à la fois fidèle à la biologie et crédible.

Simulation spatiale et intégrale : le verdict du rendu visuel

La dernière étape du travail de 1979 consiste dans un premier temps à faire compléter par l'ordinateur les profils d'architecture en 2D par des symboles alphanumériques assez grossiers représentant les feuilles (deux parenthèses accolées) et les fruits (deux astérisques superposées)[1]. Pour faire déterminer par l'ordinateur les nœuds porteurs de feuilles et/ou de fruits, de Reffye lui fait prendre en compte à chaque fois l'âge et la situation du nœud. Il réutilise en partie les règles sur les durées de vie qu'il avait déjà employées dans le modèle de 1976 alors qu'il ne prenait encore en compte que les valeurs moyennes et les groupes d'axes. De Reffye affirme alors qu'il dispose de « toute l'information nécessaire pour *reconstituer* entièrement le robusta étudié »[2].

À ce stade-là, il ne parle donc plus de modélisation, mais bien de *reconstitution* du caféier. Qu'entend-il par là ? En fait, il conçoit la reconstitution essentiellement à l'image d'une réplication visuelle. Ce qui nous permet d'affirmer cela est le fait qu'à partir de cette étape de la thèse, il commence à émailler systématiquement son propos de photocopies de tracés d'arbres divers effectués sur le *plotter* HP. Et il commente ces dessins effectués par l'ordinateur avec ce genre de phrases : « Cela est bien conforme à l'observation de la plante elle-même », « La répartition et la taille des [axes] secondaires est également satisfaisante visuellement ». La « simulation intégrale » permet donc une sorte de validation qualitative, c'est-à-dire à l'œil, et valable en ce sens à l'échelle globale. D'où la multiplication des termes qui renvoient à la vision. Le rendu visuel des premiers profils intégraux devrait déjà permettre, selon lui, une sorte de légitimation de son travail quant à sa valeur biologique. Rappelons en effet ici que la biologie donne traditionnellement un fort poids à l'observation[3]. Nous ajouterions que c'est d'autant plus vrai de la botanique. De Reffye attend l'assentiment des botanistes. Cette interprétation se confirme lorsqu'on lit la phrase suivante : « Il convient de souligner que l'aspect visuel du caféier est bien restitué et que les experts de l'IFCC le reconnaissent comme valable. »[4] De Reffye recourt ici à une sorte d'argument d'autorité. Mais les autorités dont il se réclame sont elles-mêmes reconnues, semble-t-il. Donc l'argument peut, selon lui, être jugé bon. En fait, il fait référence ici au savoir enfoui de l'expert. Ce savoir, non aisément formulable, se caractériserait selon lui par le fait qu'il ne peut servir de pierre de touche qu'à une échelle intégrée. Il ne pouvait donc valoir sur des modèles mathématiques locaux. L'expert serait alors celui qui a acquis une espèce de flair valable essentiellement sur le terrain, c'est-à-dire au cœur des phénomènes dans leurs manifestations intriquées, et complexes pour cela. Les experts porteraient en eux, en leur compétence inséparablement intellectuelle et pragmatique, le moyen de discriminer les bonnes simulations intégrales des mauvaises. À bien y réfléchir, cela supposerait au fond que l'expert procède, sans qu'il en ait peut-être réellement

[1] C'est là qu'apparaît criante la différence entre les simulations de Cohen (1967), de Honda (1971) et celle de de Reffye (1979). Cohen et Honda bénéficiaient des meilleurs écrans graphiques de leur époque. En 1979, de Reffye est encore loin de pouvoir leur faire concurrence du point de vue du rendu graphique. Et pourtant, ses simulations sont davantage fidèles à la botanique.
[2] [Reffye (de), Ph., 1979], p. 109. C'est nous qui soulignons.
[3] Pour ce constat, nous suivons [Keller, E. F., 2002, 2003], chapter 7.
[4] [Reffye (de), Ph., 1979], p. 111.

conscience, de la même manière que l'infrastructure informatique du programme général en HPL[1] de de Reffye : une intégration de savoirs épars, une intrication de systématicités ou de cohérences locales, partielles et distribuées. Toutes choses que l'on renvoie ordinairement à un savoir de type plutôt qualitatif car faiblement résumable et donc difficilement formulable et communicable. À tirer jusqu'au bout les conséquences de ces hypothèses implicites dans le propos cité plus haut, on devrait donc conclure qu'aux yeux de de Reffye, son programme simule le sens du réel qu'a patiemment acquis l'expert au contact du terrain : en répliquant le réel, il simule la compétence de l'expert, à savoir l'expertise elle-même. Et il lui semble pour cela rompre en partie la barrière traditionnelle entre le savoir qualitatif non transférable et le savoir quantitatif seul transférable.

Simulation de la phyllotaxie

Cependant, pour être plus crédible, le passage à la simulation intégrale et effective (en 3 D) impose, dans un second temps, d'ajouter les deux modules de prise en charge des aspects géométriques et mécaniques de l'arbre. Pour la géométrie, il faut notamment prendre en compte la phyllotaxie réelle des rameaux. Elle peut être spiralée ou plane. De Reffye rappelle que tout problème de cet ordre peut être géré comme la rotation dans l'espace d'un vecteur autour de l'axe qui porte le rameau. Il reprend donc explicitement la vieille notion d'« angle de divergence » déjà développée par Schimper et Braun. Et il écrit la formule analytique permettant d'exprimer le nouveau vecteur en fonction du précédent. Il est à noter que cette formule ne pose en elle-même aucun problème. Elle se suffit d'être récursive puisque le traitement des axes, dans la simulation, est exhaustif et pas à pas. Elle peut même être complexifiée à volonté, par la suite. Elle est de toute façon aisément supportée par l'infrastructure logicielle.

Cette formule présente l'avantage d'être très simple chez le caféier. Et, même si son objectif est la conception d'un modèle de simulation universel, pour la simulation tridimensionnelle effective, de Reffye se limite dans un premier temps à ce type d'arbre. On peut ainsi considérer que les N premiers axes d'un caféier, ou axes d'ordre 1, sont régulièrement implantés en formant des angles de $2\pi/N$ les uns par rapport aux autres. Quant au sous-modèle « mécanique », de Reffye reprend simplement ses travaux publiés de 1976 sur la simulation du flambage et de la casse que nous avions déjà analysés plus haut.

Vitesse, mémoire et souplesse limitées

Finalement, avec ces deux derniers modules, de Reffye peut faire représenter à l'ordinateur un arbre subissant son propre poids, sous n'importe quel angle de vue et avec une prise en compte de la perspective. Il s'agit d'une projection encore plus visuellement réaliste, car elle est effectuée sans rabattement comme c'était en revanche le cas pour les simples « représentations graphiques ». De Reffye donne la liste intégrale des programmes HPL en annexe : ils occupent de 100 à 152 lignes. Le programme le plus long prend 5,5 Ko de mémoire vive. C'est-à-dire qu'ils utilisent parfois presque la moitié de la mémoire disponible (15 Ko). De plus la plupart des registres sont employés. De fait, les points calculés sont dessinés au moment même où ils sont calculés : pour des raisons de limitation en mémoire, ils ne demeurent plus directement accessibles après coup. Ces limitations en mémoire sont par ailleurs contournées par une

[1] Sans le savoir, il rejoint ainsi l'idée de Honda.

programmation qui utilise massivement la récursivité et la définition des tâches sous la forme de sous-routines que le programme principal appelle un grand nombre de fois.

Un autre enseignement de ces derniers ajouts est la faible manœuvrabilité de la simulation intégrale obtenue. Pour ces raisons de limitation de vitesse et de mémoire, faire effectuer une simulation intégrale sur l'ordinateur disponible alors à l'IFCC prend énormément de temps :

« À titre d'exemple sur le calculateur HP 9825, il faut 20 minutes pour tracer un caféier aléatoire en rabattement à la dimension 70 [= nombre d'unités de croissance], mais il faut 4 heures pour obtenir une projection plane de la construction spatiale de l'arbre en flexion. »[1]

Les calculs les plus lourds sont donc de loin ceux qui sont exigés par la prise en compte des rotations et des flexions successives des axes et des unités de croissance dans l'espace. La topologie elle-même, avec ses processus stochastiques gérés par la méthode de Monte-Carlo, se révèle finalement assez peu coûteuse en temps. Il peut donc paraître parfois préférable de se limiter aux « représentations graphiques » initiales sans recourir aux modules de mise en espace géométrique. La gestion de la tridimensionnalité demande donc un surcroît de mémoire et un progrès dans les vitesses de calcul.

Néanmoins, la conservation de ces modules est essentielle à de Reffye pour qu'il accomplisse tout à fait la tâche qu'Hallé lui avait entre-temps assignée : simuler de manière réaliste, du point de vue botanique, tous les « modèles architecturaux ». En quelques pages mais en recourant surtout aux reproductions des différents résultats visuels, de Reffye montre que les concepts probabilistes, géométriques et mécaniques qu'il a introduits sur le cas particulier du caféier mais dans un souci de généralité, de même que l'infrastructure informatique qu'il a mise au point pour les intégrer les uns aux autres, valent aussi bien pour chacun de tous les modèles architecturaux que pour le caféier :

« *Le but fixé est de faire croître une plante fictive d'un modèle donné selon la stratégie architecturale définie par (Hallé, Oldeman et Tomlinson, 1978). Naturellement une grande souplesse de programmation est nécessaire, afin de permettre d'aborder la variabilité au sein d'un même modèle, et d'approcher d'aussi près que l'on veut une espèce réelle particulière.* »[2]

Autrement dit, de Reffye reconnaît le caractère « fictif » de la plante simulée, mais au sens où c'est la réplication d'une plante possible et non nécessairement la reproduction d'une plante réelle particulière. Une telle simulation permet l'exploration des possibles. En ce sens, elle rejoint le pouvoir qu'ont les mathématiques de dire, ou plutôt de faire voir et d'explorer toute la virtualité du réel avant qu'il n'advienne[3]. Dans tous ses modèles stochastiques, elle capte en effet toute la variabilité *a priori* localement possible de telle sorte que la variabilité de l'architecture globale soit une résultante des variabilités locales sans leur être pour autant ni directement ni simplement proportionnée. Elle permet ainsi de serrer au plus près le réel observable, singulier, notamment lorsque l'on ajoute des sous-modèles qui prennent en compte des phénomènes biologiques de plus en plus fins.

---

[1] [Reffye (de), Ph., 1979], p. 133.
[2] [Reffye (de), Ph., 1979], p. 136.
[3] Mais c'est une virtualité complexe et réaliste. Elle n'est pas théorique ni mono-axiomatisée comme la virtualité mathématique que conçoit Gilles-Gaston Granger *in* [Granger, G.-G., 1995], pp. 232-234.

Quand on change de modèle architectural, on peut modifier les paramètres des sous-modèles mathématiques et de leurs divers branchements conditionnels pour les adapter le mieux possible à la diversité botanique réelle : là est le sens de cette souplesse que de Reffye invoque. Il nous faut cependant remarquer que dans cette première version en HPL, c'est sur le programme lui-même qu'il faut le plus souvent intervenir pour modifier les paramètres. Cette souplesse demeure donc très relative : elle ne se vérifie que pour l'utilisateur qui aurait directement accès à la liste du programme. La généralité du programme n'est en fait perceptible que pour son concepteur. Dans quelle mesure finalement une telle souplesse peut-elle être le réel signe d'une généralité de l'infrastructure du modèle de simulation ? Car, fidèle à sa quête d'éventuelles lois générales de la nature, c'est bien cette idée que de Reffye essaie de mettre en valeur sur la fin de son travail.

Davantage : le programme a-t-il réellement capté une structure abstraite suffisamment générale pour rendre compte jusque dans le détail de tous les types d'architecture végétale recensés ? Autrement dit : est-ce encore un modèle ? S'il ne nous appartient pas de répondre à cette question, tout au moins le fait que de Reffye se la pose et croit pouvoir y répondre par l'affirmative nous indique que la structure du modèle a du moins changé de nature : le modèle qui sous-tend la simulation ne peut plus être dit mathématique. C'est un modèle mixte, pluriformalisé. Comme dans les travaux précédents menés par de Reffye sur le cacaoyer, c'est bien une infrastructure informatique qui permet ici la compatibilité et l'interopérabilité entre les sous-modèles mathématiques. En 1981, de Reffye s'avancera un peu plus encore et dévoilera la raison profonde qui lui fait penser qu'il touche là à quelque chose d'universel et de fortement déterminant. Il considérera en effet que le programme informatique « n'est autre que la traduction du programme génétique du modèle [architectural] »[1].

Diversité des applications réalisées et envisagées

À l'issue de son travail de recherche, de Reffye croit pouvoir déceler au moins 4 champs d'application possible pour ses simulations :

1) Sur le plan de la botanique, la continuité sous-jacente découverte entre les différents modèles architecturaux pourrait être utile aux botanistes théoriciens comme aux spécialistes de la phylogenèse. Le modèle de simulation pourrait aider à concevoir d'une manière de nouveau *unifiée* la structure générale d'une plante. Ici, de Reffye exprime donc quelque chose comme le souhait d'en revenir aux spéculations goethéennes sur la « plante primitive » unique. Ce qui indique que la diversité des modèles architecturaux le gêne, même s'il en a pris son parti. Il lui paraît de surcroît possible de « tester les implications graphiques de toute hypothèse théorique sur le fonctionnement des bourgeons »[2]. À cet égard, de Reffye affirme que le tracé graphique est indispensable puisqu'à ce niveau-là, c'est l'expert qui doit être le dernier juge. Dans ce cas de figure, la simulation vaut comme une espèce nouvelle d'expérimentation : elle permet de rejeter certains sous-modèles mathématiques dans le cas où la simulation intégrale n'est pas validée par « l'œil de l'expert »[3]. De Reffye reprend en fait ici une idée dont nous avons vu qu'elle avait été énoncée par Honda dès 1971.

[1] [Reffye (de), Ph., 1981], p. 83.
[2] [Reffye (de), Ph., 1979], p. 174.
[3] [Reffye (de), Ph., 1979], p. 174.

2) Sur le plan des théories de la morphogenèse, des études quantitatives transversales pourraient être menées sur la simulation de manière à mettre en évidence d'éventuelles interdépendances du point de vue du fonctionnement.
3) Sur un plan très appliqué cette fois-ci, il rappelle que des méthodes de récolte automatique ont déjà tiré parti des simulations du comportement mécanique des arbres à l'IFCC : la verse est prévenue sur le terrain grâce à ce moyen de la prédire par ordinateur. La production s'en trouve augmentée. Les machines à récolte automatique bénéficient aussi d'une meilleure connaissance des propriétés mécaniques des arbres (oscillations, résonances…) et sont plus efficaces.
4) Sur le plan plus strictement agronomique, celui de la productivité à l'hectare, de Reffye précise que son logiciel peut *a priori* prendre en compte la gêne entre arbres (si on lui fournit les paramètres mesurés sur un échantillon) et qu'il peut donc calculer le nombre de fleurs à l'hectare en fonction de la densité des arbres[1] : il lui serait donc possible, par tâtonnements, de désigner approximativement la densité optimale. Il indique qu'en cette fin de l'année 1979, des expérimentations allant dans ce sens sont en cours.

Il n'en demeure pas moins que, du point de vue agronomique qui reste d'abord le sien à cette époque, la réussite principale de cette simulation tient dans sa capacité à prédire très précisément la production annuelle moyenne d'un clone de caféier : de Reffye trouve une corrélation de 98% entre ce qui est observé et ce qui est simulé. Néanmoins, si ce travail de modélisation et de simulation montre que l'architecture est bien définie à un âge donné, elle montre aussi que, pour une individu, la floraison, et donc la production, est fortement dépendante du climat. Certaines anomalies des essais agronomiques trouvent là leur explication. L'optimisation à partir du rapport architecture/rendement reste toutefois possible si on la conçoit au niveau de l'espérance mathématique. Donc, même si elle s'est montrée capable d'expliquer et de contourner ponctuellement les insuffisances de la méthode des plans d'expériences, la solution de modélisation de de Reffye ne paraît pas susceptible de la remplacer toutes affaires cessantes et sans condition.

Réception et suite immédiate du programme de simulation des plantes (1979-1981)

C'est dans de bonnes conditions que de Reffye soutient ce travail de thèse à l'Université d'Orsay à la fin de 1979. Son jury est composé de Yves Demarly, Francis Hallé, Yvette Dattée[2] (professeur de génétique à Orsay), Claude Millier (professeur de « biomathématique » à l'ENGREF[3]), M. Lapasset (physicien de l'Université d'Abidjan). Vis-à-vis de ses collègues directs, de Reffye obtient rapidement un certain succès même du côté des botanistes qui sont peu habitués aux équations mathématiques. De fait, les simulations graphiques font beaucoup pour la persuasion de certains de ses collègues encore très réfractaires à toute formalisation en botanique : de Reffye découvre ainsi le formidable pouvoir de communication et de persuasion que

[1] Car, là encore, les modèles biométriques ne sont pas capables d'interpoler des fonctions complexes hautement non-linéaires : la désignation des valeurs optimales pourrait donc être effectuée par synthèse, c'est-à-dire par simulation.
[2] Yvette Dattée avait formé des générations d'ingénieurs/chercheurs en poste à l'IFCC. Elle était donc restée particulièrement liée à cet institut. Voir [Bichat, H. et Varenne, F., 2001].
[3] Millier travaille alors essentiellement dans l'esprit de l'école de biométrie française. Il développe des recherches en statistiques multidimensionnelles appliquées à l'analyse spatiale des écosystèmes forestiers. Il s'est aussi intéressé plus généralement aux modèles mathématiques dynamiques et à la cartographie statistique. Il est actuellement, en 2003, Directeur Scientifique de l'ENGREF.

lui permettent ces mises en images du modèle fragmenté. Le trouble et l'admiration que ces images causent se transmettent également aux supérieurs hiérarchiques de de Reffye. Ces derniers commencent à considérer qu'ils ont là un chercheur de premier plan, même si, dans les deux années qui suivent, ils ne trouvent pas à l'employer ailleurs que dans un même contexte de science appliquée. D'autant plus que l'approche de de Reffye ne fait tout de même pas l'unanimité dans la mesure où il rencontre inévitablement les critiques des écophysiologistes. Ces derniers lui reprochent de ne se livrer qu'à une modélisation platement descriptive alors qu'il faudrait s'intéresser aux véritables mécanismes et facteurs en jeu dans la croissance : température, humidité, nutrition, mécanismes de fonctionnement des bourgeons… Il ne les convainc pas du tout lorsqu'il invoque le fait que sa modélisation probabiliste rend compte des « causes » et qu'en cela elle serait supérieure à l'approche phénoménologique des modèles statistiques classiques.

Dans les mois qui suivent, il reste en Côte-d'Ivoire, notamment pour poursuivre les expérimentations qui doivent servir au calibrage des simulations de gêne lorsque les arbres simulés sont en futaie. D'autre part, il continue à travailler à la modélisation d'équilibres biologiques (pollinisation par des insectes) en compagnie de son collègue agronome de l'IFCC, René Lecoustre. Il est à noter que la simulation de la gêne qui devait aboutir à la désignation des densités optimales échoue en réalité assez vite, notamment du fait des limitations en calcul de l'ordinateur HP employé. Il faudrait modéliser la co-croissance d'un certain nombre d'arbres voisins. Or, si l'on conserve la solution du suivi méristème par méristème, cela suppose de prendre en compte un très grand nombre de points de calcul. Et cela nécessite aussi de ne pas négliger les aspects géométriques et mécaniques dont on a vu qu'ils exigeaient une bien plus grande rapidité de calcul. Ce qui se révèle au-delà des capacités des HP 9825, même dotés d'extensions de mémoire. C'est un des premiers échecs que rencontre de Reffye : sa méthode de simulation réaliste semble ne pas permettre le passage à l'échelle des peuplements ou des plantations, c'est-à-dire à l'échelle réellement agronomique.

À cette même époque, il subit un autre échec qui l'affecte assez profondément : son refus au concours d'entrée à l'INRA comme chargé de recherche. De Reffye sent à ce moment-là que son approche peut lui permettre d'entreprendre et de poursuivre des recherches de nature plus fondamentale, mais toujours en lien avec l'agronomie. C'est pourquoi il se présente à ce concours, en partie aussi avec l'espoir de rentrer en métropole avec sa famille. Il décide de miser sur son travail antérieur de modélisation stochastique et fragmentée de la pollinisation du cacaoyer par les insectes. Le fait que l'application en agronomie soit, pour ce travail, d'ores et déjà incontestable lui semble un facteur important. Il rédige donc un document de synthèse à l'attention du jury : comme à son habitude, il présente un travail de modélisation fragmentée en deux parties, celle des moments favorables de la plante, puis celle du comportement des insectes, la combinaison informatique des deux modélisations permettant une prévision de la pollinisation et donc de la fructification. Mais le jury, constitué essentiellement de biologistes et d'agronomes, semble totalement désorienté par cette approche très inhabituelle : la modélisation stochastique par la théorie des files d'attente lui est notamment très peu familière. Le document lui paraît d'ailleurs mal présenté et assez abscons. La grande majorité du jury n'est donc pas convaincue. De Reffye n'est pratiquement soutenu que par un seul jeune chercheur, alors rattaché au « secteur végétal » et directeur du « département de pathologie végétale » de l'INRA, Alain Coléno[1]. Ce dernier reconnaît une valeur indéniable au raisonnement général du candidat même s'il avoue ne pas pouvoir suivre dans le détail l'approche informatique, cela malgré le fait qu'il est sans doute un des

[1] Sur cette information que nous avons recoupée, voir [Bichat, H. et Varenne, F., 2001], p. 8 et [Coléno, A. et Varenne, F., 2001], p. 6.

plus qualifiés du jury pour évaluer le côté statistique du travail de de Reffye. Mais arrêtons-nous brièvement sur ce personnage un peu hors norme de l'INRA, puisqu'il se souviendra de cette première rencontre malheureuse et qu'il jouera plus tard un rôle important dans la carrière de de Reffye. Nous reviendrons par la suite sur le cursus de de Reffye.

Ingénieur de l'INA, Coléno avait passé son doctorat d'Etat en 1973, à l'Université de Rennes. Son travail portait sur les maladies bactériennes affectant les végétaux. Selon Coléno, cette thématique devait être abordée tant du point de vue immunologique que du point de vue populationnel, dès lors que la médecine des plantes en semis, à la différence de la médecine animale, a tout de suite à faire à des problèmes de transmission et de multiplication au niveau du plant tout entier. Dans la deuxième partie de sa thèse, très statistique et fidèle à l'esprit de la biométrie anglaise, Coléno montrait que l'on pouvait déterminer des seuils de contamination en deçà desquels la transmission était improbable et la maladie peu susceptible de se développer. Cette partie débouchait assez naturellement sur des applications immédiates en agronomie. Mais l'Université considéra que ce côté pratique n'avait rien à faire dans une thèse d'Etat en biologie et elle la lui fit supprimer avant la soutenance[1]. Coléno fut tout de même recruté à l'INRA comme chargé de recherche. Il continua à y travailler sur des problèmes de pathologie végétale. Il recourait pour cela essentiellement à des techniques d'analyse de données (dans un esprit inductiviste proche de celui de Benzécri[2]), d'analyse en composante principale, voire à des techniques d'analyse non-paramétrique. Ces techniques étaient alors en plein essor à l'INRA, notamment grâce à l'informatique. Coléno recourait également à la modélisation par compartiments, en particulier dans l'étude des relations entre le développement, les différents cycles parasitaires et les conditions météorologiques favorisant ou non une maladie. Dans le département de pathologie végétale, dont il devint le directeur en 1978 et en partie sous son impulsion, régnait une sorte de pluridisciplinarité assez féconde et qui se résumait surtout à une collaboration entre mathématiciens et biologistes autour de ce que Legay commençait à appeler publiquement la « méthode des modèles ».

À l'époque où il rencontre de Reffye, Coléno a donc un passé de biométricien particulièrement aguerri. Pour sa part, la candidature de de Reffye coïncide avec le moment où il emprunte plus personnellement ce qu'il appelle une troisième voie pour la modélisation mathématique en pathologie végétale, à côté de la modélisation génétique et de la modélisation statistique : la modélisation des études qui mènent au diagnostic. Ce travail donne un rôle central à l'ordinateur, mais conçu comme machine de simulation logique du raisonnement de l'expert en microbiologie. C'est d'ailleurs pourquoi Coléno tissa par la suite des liens avec les chercheurs en systèmes experts et en intelligence artificielle. Pour ce bon praticien et bon connaisseur des différents types de modélisation mathématique alors en usage, pour ce plus récent partisan de l'informatisation des compétences, la simulation réaliste de de Reffye révèle toutefois un emploi très nouveau des probabilités d'une part et de l'ordinateur d'autre part. Même s'il n'y reconnaît aucune des façons de modéliser qu'il pratique jusqu'alors, Coléno sent malgré tout qu'il y a là une nouvelle piste qu'il faut défendre : c'est pourquoi il soutient de Reffye contre la majorité de ses collègues. Mais ce soutien ne suffira pas.

Cet épisode révèle assez combien la modélisation fragmentée doublée d'une simulation sur ordinateur peut, à l'époque, recevoir un faible d'écho : l'intérêt scientifique apparaît très peu évident aux yeux du jury. De Reffye restera longtemps assez dépité de la décision prise. Sur le moment, il ressent durement ce refus de l'INRA. Il en conçoit de nouveau une certaine amertume

[1] [Coléno, A. et Varenne, F., 2001], pp. 2-3.
[2] [Coléno, A. et Varenne, F., 2001], p. 3.

par rapport à sa vocation de chercheur dont on sait par ailleurs qu'il doute régulièrement et cela, dès sa période de formation.

Bientôt cependant, une opportunité de rentrer en France, tout en restant dans son institution d'accueil, s'offre à lui. Et il choisit d'accepter ce qu'on lui propose : il rentre en France, à Montpellier plus précisément, où il est rattaché à la station de l'IFCC qui deviendra en 1983 l'IRCC (*Institut de Recherche sur le Café, le Cacao et autres plantes stimulantes*) suite à des remaniements institutionnels majeurs dont nous allons montrer tout de suite qu'il y prend part rapidement.

CHAPITRE 28 – La première convergence : avec l'informatique graphique (1981-1985)

Refusé à l'INRA, mais toujours en poste à l'IFCC, de Reffye va en effet se trouver directement aux prises avec les projets institutionnels et les restructurations fondamentales que vont subir les instituts de recherche tropicale en ce début des années 1980. Il y a deux explications majeures à ces restructurations de la recherche tropicale française. D'une part, le processus de décolonisation touche à son terme. Les nouveaux Etats concernés poursuivent plus que jamais la reprise en main de la recherche agronomique qui s'effectue sur leurs propres territoires. Il faut donc donner une autre dimension et de nouvelles fonctions à la recherche française expatriée dans ces pays si l'on ne veut pas la voir tout bonnement disparaître[1]. Les instituts dédiés aux recherches tropicales sont souvent implantés dans des pays où la présence française est restée, pour certains, remarquablement faible par rapport à d'anciennes autres colonies : la conservation d'un pôle avancé de recherche, dans de telles conditions, appelle d'autres arguments que la simple invocation d'une amitié ancienne ou que le simple maintien de rapports dits privilégiés. La seconde raison est de nature économique : les instituts français de recherche tropicale commencent à être victimes d'une féroce concurrence internationale dans la mesure où certains pays émergents ont désormais les moyens de faire entendre leur voix dans le petit monde de la recherche internationale. C'est donc à ce moment-là, en 1980, qu'est décidé la création du GERDAT, le *Groupement d'Enseignement et de Recherche pour l'Agronomie Tropicale*. L'ingénieur agronome Hervé Bichat est alors nommé directeur de ce nouvel EPIC (Etablissement Public à caractère Industrielle et Commercial). Il rassemble la dizaine des instituts de recherche tropicale dont chacun était au départ dédié à une filière ou à une production spécifique : végétale, animale, forestière, caféière ... De Reffye va être appelé à jouer un rôle institutionnel au sein du GERDAT. Certaines de ces compétences vont en effet être mises à contribution, ce qui, pendant un temps, va avoir pour effet de donner un coup d'arrêt à ses recherches en modélisation des plantes, tout en lui donnant une place privilégiée au sein de son institution.

Du terrain de la simulation à la simulation comme terrain

Malgré des débuts donc peu prometteurs voire très alarmants, du point de vue du développement de la simulation informatique, cette période de l'histoire de la modélisation des plantes va pourtant se conclure sur une formidable reconnaissance et une considérable diffusion de ses pratiques dans de nombreux secteurs de la recherche. Née sur le terrain agronomique, la simulation va devenir en elle-même un *véritable terrain d'expérimentation* pour de nombreux autres domaines. Avec le retour de de Reffye en France et la création de son laboratoire propre, on peut ainsi dire à bon droit que l'on passe de « la simulation sur le terrain » au « terrain de la simulation ». La simulation devient en effet un terrain en deux sens : elle est une technique de modélisation qui devient le terrain, le lieu de jonctions et de convergences tout à fait nouvelles et privilégiées entre des approches de la plante jusque là éloignées entre elles, comme celles de l'informatique graphique, du paysagisme, de la foresterie, de la sylviculture ou de la botanique. Au cours des années 1990, nombre de ces pratiques au départ hétérogènes vont se sentir tour à tour

[1] Voir, sur tous ces points, notre entretien avec Hervé Bichat, [Bichat, H. et Varenne, F., 2001], p. 1.

dans l'obligation de s'appuyer opportunément sur l'approche de de Reffye : elles vont se joindre les unes aux autres sur ce lieu commun, sur ce « sens commun » du second genre, sur ce nouveau *terrain commun* qu'est la simulation réaliste de la plante individuelle. Cette convergence sociologique et institutionnelle est rendue possible parce que la simulation est devenue, entre-temps et plus profondément, un terrain en un autre sens : elle est *le terrain d'expérimentations virtuelles*. Elle est le double d'une réalité empirique complexe qu'elle peut remplacer avantageusement pour ces diverses disciplines ou pratiques qui se rendent compte, à peu près au même moment, qu'elles doivent prendre en considération la plante au niveau individuel. Certes, cette idée d'une *expérimentation virtuelle* peut choquer et sembler excessive. Pourtant les artisans de cette convergence et de cette consolidation de la simulation des plantes en France vont la revendiquer et lui donner une forme de crédibilité bien particulière qu'il nous faut pour cela explorer dans son établissement. Il sera donc hautement instructif pour nous de retracer les événements et les conditions institutionnelles, conceptuelles et techniques qui ont permis ce revirement, cette *convergence décisive* et cette consolidation assez inattendues *a priori* : ce sont eux seuls qui expliquent comment la simulation des plantes sort définitivement du stade des spéculations théoriques, en particulier en France, au cours des années 1990, malgré les résistances que, sous cette nouvelle forme, elle va encore rencontrer.

Le retour en métropole : création et informatisation du CIRAD

En 1981, Bichat décide donc de réorganiser le groupement de manière à lui donner plus de cohésion sans pour cela briser les spécificités traditionnelles de chaque institut. Pendant trois ans il va travailler à faire du GERDAT ce qui sera nommé à partir de 1984 le CIRAD : *Centre de Coopération Internationale et Recherche Agronomique pour le Développement*. En accord avec le gouvernement français de l'époque, Bichat choisit de mettre en avant le côté « coopération » et « aide au développement » de manière à prendre explicitement en compte, dans la politique de recherche, les intérêts économiques et sociaux des pays d'accueil. Il dispose pour cela de l'appui d'Alain Savary[1] puis d'Hubert Curien[2]. Comme ce fut le cas pour les instituts naguère indépendants, le GERDAT puis le CIRAD fonctionneront selon le principe d'une recherche appliquée directement à même de dégager des fonds propres grâce à des contrats ponctuels passés avec les pouvoirs publics français, avec des entreprises privées ou encore avec des gouvernements étrangers. Le statut du CIRAD reste donc bien différent de celui de l'INRA ou du CNRS.

Dans son travail d'unification de la recherche tropicale appliquée, même s'il n'est pas partisan d'un jacobinisme à outrance et s'il préfère l'idée d'une confédération d'instituts, Bichat perçoit rapidement la nécessité et l'intérêt d'une informatisation précoce de son institution. En effet, il lui faut gérer onze organismes dont les statuts demeurent malgré tout assez différents. La gestion de l'information et des ressources devient, dans ces conditions, un enjeu majeur. De plus, la nécessité de disposer d'un réseau informatique interne s'impose plus que jamais au GERDAT puisque la plupart des instituts sont localisés dans l'outre-mer, c'est-à-dire très loin les uns des autres. Pour en assurer un meilleur contrôle, la direction se sent donc dans l'obligation de matérialiser en quelque sorte l'unité organique du groupement. C'est la solution de l'informatique répartie qui s'impose alors à Bichat dans une époque particulièrement ouverte à cette idée puisque, rappelons-le, vient de paraître l'important rapport de Nora et Minc (1979). Ce dernier, on

[1] Ministre de l'Education Nationale de mai 1981 à juillet 1984, date à laquelle il démissionne.
[2] Ministre de la Recherche et de la Technologie de 1984 à 1986 et de 1988 à 1993.

s'en souvient, met beaucoup l'accent sur le côté gestion-centralisation-redistribution de l'information grâce aux solutions informatiques.

C'est précisément à ce moment-là que Bichat se souvient de de Reffye. Bichat est l'un des premiers à admirer son travail de simulation sur ordinateur. Et il reconnaît volontiers une sorte de génie chez ce collègue qu'il avait rencontré naguère sur le terrain, lorsqu'il était lui-même dans un poste de direction en Côte-d'Ivoire. Cependant, les applications de son travail paraissent en réalité bien minces. L'activité essentielle du CIRAD consiste toujours en l'amélioration des sols, des graines et des techniques de culture. La prévision de la verse du caféier et la prise en compte des problèmes mécaniques des arbres paraît à ce moment-là un problème dépourvu de généralité et donc d'urgence. Il semble très marginal. En 1981 donc, en accord avec le secrétaire général du GERDAT, Jean-Marie Sifferlen, Bichat nomme de Reffye (qui vient à peine d'arriver à la station de l'IFCC de Montpellier) à la tête du Centre Informatique du GERDAT. Bichat, ne disposant pas d'informaticien de formation au GERDAT, fait donc confiance à un autodidacte dont la compétence est toutefois reconnue, en interne, par ses pairs. Il s'appuie en fait surtout sur la personnalité de de Reffye qu'il trouve rigoureuse, conciliante et diplomate. L'informatisation d'une institution étant toujours l'occasion de luttes violentes et de redistribution de pouvoir intenses, une telle personnalité fédératrice semble le meilleur choix pour Sifferlen et Bichat. Outre le fait qu'il s'agit d'une promotion importante pour lui, de Reffye accepte cette proposition pour au moins trois autres raisons. Tout d'abord, en se rapprochant des instances de décision, il rend définitif son retour en France. Ensuite, notamment après son échec à l'INRA, il est disposé à abandonner à ce moment-là la recherche. Il se sent saturé. Le travail dans l'isolement lui a pesé. Surtout il ressent assez mal le faible écho que ses travaux suscitent au-delà du succès d'estime indéniable qu'il remporte auprès de ses collègues directs de l'IFCC. Il se sent en réalité très peu soutenu de ce côté-là. Enfin, il a lui-même le sentiment d'avoir fait le tour de la question qu'il s'était lui-même posée dans le cadre de sa thèse : il ne voit pas comment renouveler sa propre problématique de simulation. On peut ajouter qu'il est probablement dépité face aux résultats en demi-teinte des recherches qu'il a entre-temps poursuivies sur l'optimisation de la densité assistée par la simulation. Il doute très certainement. Le chemin qu'il voit s'ouvrir à lui dans l'immédiat est celui d'un rapprochement possible avec des informaticiens de métier qui sauront peut-être améliorer son logiciel, à côté du travail d'informatisation du GERDAT.

Dans son nouveau poste, son activité consiste essentiellement à recruter de jeunes ingénieurs informaticiens dont il supervise ensuite le travail. De Reffye ne part pas de zéro. Il s'agit surtout de réorganiser les réseaux déjà existants. Bichat veut un outil informatique puissant susceptible de livrer des indicateurs sur le fonctionnement technique, scientifique, commercial ou administratif de chacune des petites unités du GERDAT afin de déterminer les problèmes communs et de les maîtriser ensemble et rapidement. De Reffye recrute plusieurs ingénieurs de l'ENSIMAG (Grenoble), dont Joël Sor, qui sauront développer avec lui, en deux ans, un système informatique très performant.

Pendant ces années, de Reffye ne modifie pas fondamentalement l'architecture de son programme. Mais, à ses heures perdues, il demande tout de même à Joël Sor de l'aider à le traduire en FORTRAN de manière à ce qu'il soit portable sur la plupart des autres machines. C'est en effet une des premières conditions à respecter lorsque l'on veut développer une solution informatique qui se veut plus générale. Sor et de Reffye vont ensuite développer les simulations de 1979 sur d'autres périphériques, notamment sur les grosses tables traçantes à rouleaux de marque Benson, puis sur les premiers écrans Tektronix qui seront disponibles au GERDAT à partir de 1982. De Reffye sait qu'il faut suivre le progrès technologique au plus près s'il veut tenter de

sortir ses simulations de l'ornière des limitations en puissance. Or, il bénéficie d'une particulière bienveillance du côté de la direction du GERDAT. Elle lui est vivement reconnaissante d'avoir réussi à implanter rapidement et sans trop de heurts un réseau informatique qui fonctionne : Sifferlen accède donc assez souvent à ses demandes d'achat supplémentaire en machines coûteuses. Bichat et Sifferlen soutiennent fortement de Reffye de ce point de vue là. De fait, le Centre Technique dont de Reffye est le responsable dépend directement de la direction du GERDAT. Financièrement, il est ainsi moins assujetti à des contrats ponctuels comme le sont en revanche les différents instituts rattachés auxquels il est demandé de dégager des fonds propres. De Reffye bénéficie en conséquence d'une sorte de traitement de faveur : on tolère qu'il se paye le luxe de faire un peu de recherche fondamentale, chose contre-nature au GERDAT, cela d'autant plus qu'il ne semble pas abuser des largesses dont on gratifie son Centre.

Pendant cette période d'arrêt de ses recherches, de Reffye s'astreint tout de même à publier sa thèse. Il le fait de manière assez détaillée (sur 66 pages en tout) dans quatre numéros successifs de la revue *Café, Cacao, Thé*, entre juin 1981 et mars 1983. Mais, comme pour ses premiers articles de modélisation publiés dans la même revue technique, l'écho qu'il en reçoit est, dans un premier temps, assez faible. Les articles de cette revue sont pourtant répertoriés dans le système international des *Current Contents*. Ce qui permet des recherches par mots-clés. Mais les articles de de Reffye sont en français et restent donc peu, voire pas du tout accessibles aux chercheurs étrangers.

La rencontre avec l'informatique graphique : itinéraire d'un informaticien français

À l'automne 1985, les choses en sont là lorsqu'un informaticien de l'Université Louis-Pasteur de Strasbourg, Jean Françon, entre directement en contact, par téléphone, avec de Reffye. C'est ce contact tout à fait décisif qui va, par la suite, le replonger dans la recherche à temps plein. Afin de pouvoir expliquer les raisons de cette rencontre féconde et en réduire un tant soit peu le caractère passablement contingent, il nous faut au préalable revenir sur la carrière et l'approche scientifique et épistémologique de Jean Françon à l'époque. Car il est pour le moins curieux qu'un chercheur en informatique théorique contacte un agronome et un simulateur de plantes pour en attendre une aide, mieux : une collaboration. Ce qui est bien le cas. Ce contact va de surcroît contribuer à établir un lien solide entre la tradition de l'informatique graphique et la simulation réaliste des plantes née en France, sur le terrain. Comme nous allons le voir, il va constituer une *première jonction* et une première consolidation du travail de de Reffye. Cette jonction sera bien la première d'une succession de convergences qui vont contribuer à renforcer considérablement le poids de la simulation réaliste des plantes en France et dans le monde. C'est à travers cette reprise en main inattendue que le travail de 1979 va finalement se révéler séminal et non terminal.

Mais qui peut bien être ce chercheur en informatique graphique qui contacte spontanément de Reffye cette année-là ? Penchons-nous un moment sur sa formation et sur sa carrière. Jean Françon est né en 1937[1]. Il avait commencé sa formation par des études de mathématiques à la fin des années 1950. En 1960, il effectua un stage d'été à la Compagnie des Machines Bull pendant lequel il apprit à programmer sur des calculateurs à cartes perforées. Ce fut son premier contact avec une technique qu'il jugea intéressante mais très lourde à mettre en œuvre. Il poursuivit alors sa formation par un DEA et une thèse de troisième cycle en physique théorique

[1] Pour ces informations, voir notre entretien [Françon, J. et Varenne, F., 2001].

appliquée à la physique nucléaire auprès de l'Université de Strasbourg. Son travail portait sur un type de modélisation mathématique de phénomènes nucléaires. Cette modélisation était à comprendre au sens d'une simplification des équations théoriques et d'une représentation approchée conçue de manière à ce que le calcul soit possible. Il choisit cette matière, nouvelle pour lui, parce qu'il était sûr d'avoir une place dans le DEA de physique et qu'il était alors très soucieux de ne pas être envoyé comme soldat en Algérie. De fait, il vécut assez mal son passage des mathématiques à la physique à cause de sa formation mathématicienne qui, signe des temps, avait été très bourbakiste : les physiciens s'autorisaient à négliger les conditions d'applications des théorèmes, comme ceux qui portent sur les fonctions de Dirac, alors qu'on lui avait enseigné qu'il fallait s'interdire ce genre de pratique. Il se trouvait ainsi en porte-à-faux et il en conclut que le « sens physique » lui faisait défaut. Il ne poursuivit donc pas en physique et accepta d'être engagé comme ingénieur en informatique en 1965 au Centre de Recherche Nucléaire de Strasbourg[1]. Il travailla d'abord essentiellement en lien avec des spécialistes de la physique. C'est à cette époque qu'il découvrit la programmation en FORTRAN à laquelle il se forma sur le tas. L'utilisation des ordinateurs prenait, dès ce moment-là, une autre dimension : la lourdeur mécanique de la programmation était atténuée. Quelques années plus tard, Jean Françon fut rattaché au Centre de calcul (CNRS) de Strasbourg Cronenbourg. C'est là qu'il eut l'occasion de diversifier ses collaborations : à côté de la programmation du calcul scientifique et de l'analyse numérique pour physicien, il programmait de l'analyse de texte pour des littéraires, voire pour des théologiens. Il conçut même un logiciel d'analyse des flux routiers à destination des géographes. C'est donc dans ce contexte qu'il apprit à pratiquer et à apprécier la pluridisciplinarité.

Mais peu à peu, cette utilisation un peu improvisée d'une technique encore mal maîtrisée, la programmation informatique, finissait par lui coûter. Son goût de la rigueur et de la maîtrise conceptuelle des techniques renaquit au contact des problèmes de plus en plus complexes de propagation d'erreur dans les programmes. Plus les programmes en langage évolué devenaient lourds, moins l'informaticien savait contrôler les erreurs. Elles pouvaient être dues soit à des problèmes d'arrondis, soit à une dépendance des opérations arithmétiques à l'égard des circuits de la machine (le *hardware*), soit encore à certaines faiblesses congénitales des langages comme le FORTRAN ou des systèmes d'exploitation, c'est-à-dire à des erreurs logicielles. Ainsi, dans l'appel d'une sous-routine en FORTRAN par exemple, ce dernier ne distinguait pas formellement les passages des paramètres par valeurs et par adresses. C'est-à-dire que le caractère local de certaines déclarations de variables à l'intérieur du sous-programme n'était pas toujours respecté. La distinction n'était pas clairement faite entre la dénomination symbolique et conventionnelle d'un paramètre et sa désignation physique par le renvoi à son adresse absolue dans la mémoire physique. Les niveaux syntaxique et sémantique étaient encore mélangés sur ce point. Ce qui était l'occasion de multiples erreurs de programmation difficilement repérables.

Jean Françon décide alors de faire de la recherche et de se lancer dans une thèse d'Etat sur ce genre de difficultés. Il choisit de s'attaquer aux problèmes de la complexité des programmes de tri. Lorsque l'on a à effectuer un tri entre des données, par exemple alphabétique, il faut souvent les comparer une à une et cela demande un travail très long à la machine. Le programme est dit complexe si les comparaisons doivent être faites une à une. Mais il y a parfois la possibilité d'utiliser des techniques permettant de diminuer le nombre de ces comparaisons. Cela permet d'améliorer les performances en temps de calcul du programme en abaissant sa complexité algorithmique. Or, être capable de désigner les conditions rigoureuses d'application de ce genre

[1] À l'époque, ce centre dépend de l'enseignement supérieur, comme l'Institut de Physique Nucléaire d'Orsay. Plus tard, il sera rattaché au CNRS et sera nommé IN2P3.

de techniques exige d'entrer de plain-pied dans un domaine des mathématiques difficile appelé la combinatoire énumérative[1]. Conscient de cela, Françon s'inscrit en thèse d'informatique théorique auprès du mathématicien strasbourgeois Dominique Foata. Foata était au départ un mathématicien qui n'entretenait pas de rapport avec l'informatique. Mais il était spécialiste de combinatoire. Or, le célèbre informaticien de Stanford, Donald Knuth, avait montré dans son *The Art of Programming* que les algorithmes de tri s'apparentaient à de l'analyse au moyen de combinatoires. Dans son deuxième tome, encore inédit, mais dont Foata possédait un manuscrit dès 1971, Knuth étudiait plus particulièrement le tri et la recherche d'informations (*Sorting and Searching*). Or, la recherche d'informations recourt elle aussi à des théorèmes de l'analyse combinatoire dès lors qu'elle utilise des arbres binaires de recherche par exemple.

À partir de 1971 donc, à côté de ses activités d'ingénieur, Françon travaille à prolonger le travail de Knuth sur quelques problèmes encore ouverts : dans sa thèse de 1979, il contribue à la production de quelques théorèmes nouveaux à valoir sur les algorithmes de tri. Mais, de son point de vue, son approche reste fondamentalement mal comprise de son directeur de thèse car ce dernier n'apprécie pas le sens de l'application informatique concrète qu'il a conservé malgré tout, par-delà son approche mathématique. Formé au départ sur le tas dans un contexte d'ingénierie informatique (il a déjà 42 ans lorsqu'il soutient sa thèse), Françon développe des *mathématiques pour l'informatique* mais pas pour les mathématiques elles-mêmes ; ce qui lui est vivement reproché. En fait, l'informatique est pour lui une science à part entière et qui, en tant que telle, a certes besoin des mathématiques mais ne se confond surtout pas avec elles. Dans son rapport avec les mathématiques, l'informatique possède pour lui un statut comparable à celui des sciences de la nature comme la physique. Mais, à l'époque, le point de vue de Françon sur ce sujet se trouve très marginal en France. En fait, à cause de sa forte séparation d'avec les recherches en mathématiques appliquées[2] dès les années 1950, l'exercice et l'enseignement de l'algorithmique et de l'informatique théorique dans l'Université française avaient très vite été accaparés et remis dans les mains de mathématiciens et non d'ingénieurs ou de chercheurs qui auraient pu travailler dans le pluridisciplinaire, à l'image de Knuth. C'étaient souvent des mathématiciens combinatoriciens qui s'étaient proclamés, sur le tard, informaticiens spécialistes de l'algorithmique. Au début des années 1980, Françon subit encore directement les conséquences de ce clivage : les mathématiciens ne le reconnaissent pas comme quelqu'un de sérieux. Et il ne pourra d'ailleurs jamais réellement enseigner sa spécialité d'origine, la combinatoire énumérative. De leur côté, les physiciens et les chimistes universitaires considèrent l'informatique comme une simple technique et non comme une science en soi. Françon doit donc lutter sur ces deux flancs pour la reconnaissance de son travail et de son approche.

Optimisation d'algorithme, nombres de Strahler et combinatoire énumérative

En 1980, malgré les rivalités qu'il éveille, Françon est tout de même nommé professeur d'informatique à l'Université de Haute-Alsace, à Mulhouse. Il y continue ses recherches en analyse

[1] Cette partie de l'analyse combinatoire se penche plus particulièrement sur le dénombrement des permutations réalisables sur un objet à n éléments. Dans le cas le plus simple, ce nombre est égal à n ! Mais cela devient rapidement difficile, non trivial, lorsque la structure de l'objet subit des contraintes et se complexifie un peu.

[2] Effectuées surtout dans les centres de calcul et dans les écoles d'ingénieurs à partir de la fin des années 1950. À titre indicatif, en 1959, suite à l'échec du programme de fabrication de l'ordinateur français autour de Couffignal, l'Université française est dotée d'autorité de quatre ordinateurs à destination des universités de Paris, Grenoble, Toulouse et Strasbourg. Ce sont les écoles d'ingénieurs qui, à Grenoble et à Toulouse, vont bénéficier de la machine. À Strasbourg, il devait servir à l'observatoire. Mais ce sont surtout les mathématiciens universitaires qui vont s'accaparer les formations en informatique, cela en rupture avec tout contexte de recherche appliquée.

d'algorithmes jusqu'en 1984 mais sans qu'on l'autorise à l'enseigner. C'est pourtant dans ce souci constant, qui lui est propre, de lier des réflexions d'informatique théorique avec des solutions existant dans la nature ou dans les théories des sciences de la nature, que Françon, sur les conseils d'un collègue américain, prend connaissance des travaux des hydrogéologues sur les arbres fluviaux. Il reconnaît là une manière de codifier une arborescence formelle qui peut apporter quelque chose pour la structuration des algorithmes. Il lit donc de près Horton, Léopold, Strahler et les combinatoriciens qui ont développé la théorie des nombres de Strahler[1]. En septembre 1983, alors qu'il doit inopinément s'absenter, il fait prononcer par un collègue une conférence sur ce sujet à Nancy, au 101ème Congrès de l'Association Française pour l'Avancement des Sciences. Cette conférence sera ensuite publiée dans la *Revue du Palais de la Découverte*[2]. Après y avoir rappelé le fait que les nombres de Strahler se retrouvent dans de nombreux secteurs des sciences de la nature et des sciences formelles (hydrogéologie, botanique, anatomie, biochimie, combinatoire et informatique), Françon précise que sa propre problématique est d'estimer le nombre de registres de mémoire nécessaires à l'évaluation d'une expression algébrique, cette dernière pouvant toujours être décomposée selon un arbre binaire de type Strahler[3]. Il montre ainsi que l'informatique théorique a pour sa part fait progresser ce domaine formel transdisciplinaire. À la fin de ces rappels vulgarisés et présentés sous une forme pédagogique, il adresse cette question ouverte au lecteur :

« Les nombres de Strahler apparaissent en informatique comme solution d'un problème d'optimisation ; ne serait-il pas possible de faire apparaître les nombres de Strahler en hydrogéologie, botanique,…, comme solution d'un principe d'optimisation, peut-être en y transposant le problème informatique ? »[4]

Françon recherche donc les éventuelles solutions que la nature auraient de son côté spontanément apportées à des problèmes selon lui analogues à ceux qui se posent en algorithmique. Ayant hérité des nombres de Strahler développés au départ dans un secteur des sciences de la nature, l'informatique théorique pourrait en retour, selon lui, éclairer les théories biologiques de la morphogenèse, par exemple. Dans un esprit proche de celui qui a pu animer la bionique, Françon tend donc la main aux sciences de la nature. D'une certaine manière, il croit fermement en une analogie entre des analogies : de même qu'il existe des analogies formelles reconnues entre différentes sciences de la nature, et étant entendu que l'algorithmique est pour lui à traiter comme une science de la nature parmi les autres, notamment dans son rapport aux mathématiques, de même il doit exister des *analogies directes entre certaines sciences de la nature et l'algorithmique*. L'algorithmique doit donc aller à l'école des sciences de la nature : le fait qu'elle le puisse déjà pour les problèmes de tri ou de recherche de données est une preuve suffisante pour Françon qu'elle n'est pas réductible à un sous-secteur des mathématiques. Mais, à cette époque, il conçoit tout de même cette aide ou ce transfert conceptuel sur le mode, finalement classique en biologie théorique (ainsi qu'on peut le voir chez Lotka, Rashevsky, Cohn et Rosen, par exemple), d'une théorisation explicative au moyen d'un principe d'optimisation. Mais cette idée va évoluer chez lui.

---

[1] Voir notre chapitre *supra*.
[2] Voir [Françon, J., 1984].
[3] [Françon, J., 1984], pp. 32-36.
[4] [Françon, J., 1984], p. 34.

Naissance de la synthèse d'images et naissance du *NYIT*

Ce n'est pas ici le lieu de retracer l'histoire détaillée des techniques matérielles et conceptuelles de synthèse d'images par ordinateur[1]. Précisons simplement qu'elle présente, *grosso modo*, trois périodes[2]. La première voit la naissance relativement discrète des techniques de synthèse d'image sur ordinateur, essentiellement dans un contexte militaire (années 1950-1970)[3]. Dès 1953, en effet, une fois couplé aux techniques radar, le système de surveillance militaire *SAGE* est informatisé. Il recourt alors à des techniques de graphismes vectorielles permettant le suivi des aéronefs. Ce sont des électroniciens et des spécialistes du traitement des signaux analogiques puis numériques qui développent cette première forme de synthèse d'images en grande partie en concevant des machines dédiées à la reconnaissance de formes soit par des tests de modèles statistiques soit par analyse numérique à base de transformées de Fourier rapides. Mais, au début des années 1960, Ivan Sutherland, alors professeur d'informatique à l'Université de l'Utah et futur co-directeur de l'entreprise commerciale *Evans & Sutherland* (fondée en 1968), amplifie le côté synthèse, en concevant et en diffusant des machines permettant de visualiser, sur un écran à balayage et à rafraîchissement de signal (de type oscilloscope), 30000 à 40000 segments de droites en 1/25ème de seconde[4]. Ces machines, fort coûteuses mais ultra-rapides, furent ensuite diffusées dans le domaine des simulateurs de vol, et plus tard dans celui de la conception graphique industrielle, en particulier en mécanique et en chimie. La « conception graphique » recourant à ce type de visualisation sera appelée CAO à la fin des années 1970.

En 1974, le riche entrepreneur Alexander Schure crée le *Computer Graphics Lab* (*CGL*) rattaché au *New York Institute of Technology* (*NYIT*)[5]. Schure possède une propriété voisine d'un des membres de la famille Rockfeller qui lui-même appartient au comité de direction de *Evans & Sutherland*. Informé par son voisin et fasciné par les premiers résultats de cette société, Schure a la volonté de réaliser le premier long métrage d'animations synthétiques et de fonder pour cela un laboratoire de recherche à New York. Il ne peut débaucher Sutherland qui se trouve lié à l'Université de l'Utah. Mais il installe Ed Catmul à la tête du *CGL*. Catmul vient juste de terminer

[1] L'historien des techniques Jean C. Baudet en rapporte quelques dates essentielles. Il insiste surtout sur la naissance de la DAO et de la CAO. Voir [Baudet, J. C., 2004], pp. 467-470.

[2] En 1996, l'infographiste et ingénieur américain Carl Machover (actuellement, en 2003, PDG d'une société de consulting en infographie : *Machover Associates Corp.*) a été chargé de travailler à la constitution d'une histoire de l'informatique graphique par le bureau éditorial de la revue *IEEE Computer Graphics and Application*. Entrant dans le détail, il recense pour sa part pas moins de 4 périodes jusqu'au milieu des années 1970 : l'ère des commencements (milieu des années 50 – débuts des années 60), l'ère des transferts de technologie venant de l'aérospatiale (début années 60 – fin années 60), l'ère des créations d'entreprises (fin des années 60 – début des années 70), l'ère des publications (milieu à fin des années 1970). Les périodes les plus récentes ne sont donc pas encore caractérisées. Voir [Machover, C., 1997], p. 7.

[3] Que nous avons croisé ponctuellement avec les travaux de Murray Eden.

[4] Pour cette précision, voir [Françon, J. et Varenne, F., 2001], p. 5. Ivan Sutherland est né en 1938 dans le Nebraska. En 1963, dans le cadre de son PhD préparé au *Lincoln Laboratory* du MIT, il propose le premier système graphique interactif : il utilise le crayon optique du TX-2 pour entrer en mémoire des dessins d'ingénieur. Profitant du fait que le TX-2 fait alors partie des rares ordinateurs directement accessibles « en ligne » (selon le désir initial de Wes Clark, son concepteur), il utilise l'écran CRT (*Cathode Ray Tube*) pour reconstituer ces dessins d'ingénieurs en permettant des variations sur l'échelle et en introduisant donc l'idée d'image recalculée. Voir sur ce point, le site de sa compagnie actuelle *SUN Microsystems* : [Sun, 1999]. Entre 1966 et 1970, sous l'impulsion d'une problématique initialement rattachée à la simulation de vol, Sutherland a aussi été un des pionniers de la réalité virtuelle conçue comme immersion dans l'image. Il avait fabriqué un casque qui donnait l'impression de l'immobilité d'un cube virtuel malgré les mouvements du corps. Voir [Cadoz, C., 1994], p. 13. À la suite d'un contrat d'exclusivité signé dans les années 1970 avec la compagnie britannique de conception de simulateurs *Rediffusion*, la société *Evans & Sutherland* participe aujourd'hui, en 2002, à la conception de près de 80% des simulateurs de vol en service dans le monde.

[5] Pour ces indications et quelques autres sur l'histoire du *CGL*, voir [Smith, A. R. et Heckbert, P., 2003].

son PhD chez Sutherland. Le *CGL* va rapidement innover grâce à des moyens financiers considérables en fait apportés par la fortune personnelle de Schure. Car le film d'animation commercialisable se fait attendre : de nombreux problèmes techniques se posent, essentiellement liés à la puissance de calcul des machines. Le *CGL* va donc surtout être à l'origine de nombreuses recherches, innovations ou « trucs » technologiques et algorithmiques dans le domaine de l'image de synthèse. À la fin des années 1980, le *CGL* a essaimé considérablement : ses anciens chercheurs sont à l'origine de la naissance ou du développement de nombreuses sociétés d'informatiques (*Apple*, *DEC*) ou de production cinématographique dont *PIXAR*, *Lucasfilm* et *NVIDIA*. Ils seront notamment à l'origine de la conception du film *Toy Story* diffusé en 1995 par *Disney-PIXAR*.

La seconde période dans l'histoire de l'image de synthèse, donc celle des années 1980, sera celle d'un fort développement[1] sous les effets simultanés 1- de progrès considérables dans les périphériques de visualisation, notamment avec les machines *DEC* puis les stations *VAX*[2] ; 2- de la mise à disposition d'ordinateurs personnels grand public (PC), avec l'industrie des jeux qui ira bientôt de pair ; et 3- de la vogue des fractales (voir encadré suivant).

La troisième période commencera au début des années 1990 et verra notamment une normalisation en même temps qu'une complexification des techniques de synthèse sous l'effet de l'accroissement en puissance de calcul des machines mais aussi face à la demande des sciences de la nature de dépasser le simple simulacre visuel, le simple « truc » de programmeur.

Par la suite, en 1984, Françon s'intéresse en effet de plus en plus directement aux problèmes théoriques que pose la synthèse d'images proches de la réalité botanique. C'est qu'il souffre du défaut de chair des concepts issus de l'informatique théorique. Il reconnaît volontiers l'aridité et l'austérité de cette science. C'est aussi pour se sauver de cette aridité qu'il provoque lui-même, si nécessaire, une rencontre plus effective avec les sciences de la nature. Il décide donc de prospecter de ce côté-là. C'est alors qu'il tombe sur l'article de l'informaticien américain Alvy Ray Smith, qui vient d'être publié dans les actes du grand colloque annuel sur la synthèse d'image, le SIGGRAPH : « *Plants, Fractals and Formal Languages* ». Smith est un ancien chercheur du *CGL* (voir encadré) et il travaille pour l'entreprise *Lucasfilm* depuis le début des années 1980. Dans une approche qu'il qualifie d'« imagerie sur ordinateur » et qu'il distingue en cela nettement du « traditionnel graphisme sur ordinateur » (CAO)[3], Smith développe une méthode générale de synthèse de tous les types de plantes à partir de L-systèmes. Fusionnant l'approche formelle de Lindenmayer et la philosophie de visualisation de l'école de Sutherland, il est le premier à rendre les L-systèmes véritablement capables de simuler visuellement des plantes sur ordinateur. Jusque là, comme nous l'avons vu, le formalisme des L-systèmes n'apportait pas avec lui un moyen d'être immédiatement et rigoureusement plongé ni appliqué dans un espace géométrique. Il y avait bien eu les tentatives d'une élève néerlandaise de Lindenmayer, Pauline Hogeweg, en 1974[4]. Mais la

[1] À partir des années 1980, le SIGGRAPH passera un cap quantitatif très symptomatique : il accueillera régulièrement jusqu'à 20000 participants et visiteurs : ingénieurs, chercheurs, industriels…

[2] Au début des années 1970, la machine commerciale DEC PDP-11 reprend les principes et la technologie du TX-2. Le *CGL* bénéficiera ensuite de la première station VAX apparue au milieu des années 1970.

[3] [Smith, A. R., 1984], p. 1. Il y oppose le "traditional computer graphics which takes the 'cubist' approach of constructing models from geometric primitives, now the domain of CAD [Computer-Aided Design]" au "*Computer Graphics,* [which] is used to refer to the newer, more flexible and subtle state of the art of computed pictures."

[4] Pauline Hogeweg avait soutenu une thèse de biologie à l'Université d'Amsterdam en 1969. En 1976, elle soutint une seconde thèse, à l'Université d'Utrecht, en collaboration avec Lindenmayer et un des ses collègues, le Dr. Ben Hesper. Son travail avait porté sur différents problèmes d'analyse de structures biologiques. Elle avait utilisé les L-systèmes pour

conformité aux plantes réelles de ses simulations était restée très fruste. Hogeweg considérait de toute façon que les L-systèmes ne pouvaient servir de modèles rigoureux qu'au niveau cellulaire ou pour les algues et que leur usage à l'échelle pluricellulaire et organique devait demeurer purement heuristique[1]. Elle se fondait pour cela sur le fait qu'à ce niveau, la physiologie, de par la mobilité que les cellules acquièrent après leur différenciation, notamment chez l'animal, prenait un poids considérable et qu'on ne pouvait plus considérer les cellules filles comme restant durablement les voisines de leurs cellules sœurs. Identifier systématiquement la modélisation des « cycles de vie » à celle de la croissance des pluricellulaires, comme aurait pu le suggérer l'approche originelle de Lindenmayer, avait donc quelque chose d'aventureux.

Dix ans plus tard donc, dans une perspective d'infographiste qui met cette fois-ci l'accent sur les images calculées directement de manière algorithmique, et afin de corriger l'insuffisance reconnue des L-systèmes, Smith a l'idée de concevoir la notion de *graftale*, contraction de « grammaire » et de « fractale ». Un objet formel est dit *graftal* s'il est le résultat topologique d'une grammaire de Lindenmayer géométriquement interprétée[2]. Smith plonge dans le plan géométrique un mot géré par le système formel de règles de réécriture en associant un segment de droite à chacune des lettres E (= *elongation*) qui apparaissent dans ce mot[3]. Par là, Smith veut accroître ce qu'il appelle le « facteur d'amplification de la base de données »[4] : en scindant explicitement et nettement, dans son programme en C, la partie computationnelle et topologique de la partie interprétative et donc géométrique du traitement du graphe, il économise en temps de calcul et il rend ainsi l'ordinateur à même de faire des animations, des petits films. Ce qui est son objectif principal puisqu'il est ingénieur dans la division *Computer Graphics* de *Lucasfilm*. C'est aussi la raison pour laquelle il juge peu opérants pour le rendu en imagerie les modèles faisant intervenir des nombres aléatoires[5].

---

se spécialiser ensuite en reconnaissance et en synthèse de formes organiques. Depuis le milieu des années 1970, elle définissait cette activité de recherche comme relevant de la bioinformatique (*bioinformatics*). Elle avait conservé l'approche épistémologique de Lindenmayer en considérant que le but de la science en général, et des formalismes en particulier, était de rechercher les lois les plus simples permettant d'engendrer la complexité perçue dans la nature ([Hogeweg, P., 1978], p. 96). Dans l'article de 1974, paru dans *Pattern Recognition*, elle montrait en particulier que les L-systèmes se prêtaient mal à la représentation graphique car ils ne présentent pas une structure de données fixe et globalement accessible ([Hogeweg, P., 1978], p. 94) : on ne peut donc définir des règles simples de traduction entre les grammaires et la géométrie. Nous dirions qu'il n'y a pas de compatibilité axiomatique simple. Elle ajoutait comme Lindenmayer : « on a besoin de conventions pour les représentations spatiales », ([Hogeweg, P., 1978], p. 94). Par la suite, en utilisant le nouveau langage de simulation à événements discrets SIMULA 67, Hogeweg a l'idée de faire simuler les arborescences engendrées par les L-systèmes (dont elle avait reconnu précédemment la structure essentiellement mouvante et non définissable *a priori*) par des emboîtements ouverts et génératifs (engendrés au cours de l'exécution du programme) de structures de données tels que ce langage les rend désormais possibles avec la notion de *pointeurs* (pratique qui annonce le langage C). De façon pour nous très significative, elle avoue que c'est le passage à ce nouveau langage de programmation qui lui permet une nouvelle présentation des modèles à L-systèmes. Elle en tire cette leçon générale : "The medium in which the model is expressed is of crucial importance because it guides the initial formulation of the model and determines which extensions are conceptually 'easy'. The medium to express simulation models is commonly called language, but its essential features are not so much those which computer languages share with natural languages, but rather the control and datastructures the computer languages provides. With respect to control and datastructures, natural languages do not differ very much, but computer languages do. Therefore different simulation languages provide different thinking media, which profoundly influence our ways of thinking and our choice of models." En 2000, Pauline Hogeweg exerce toujours et dirige le groupe de « Biologie théorique et bioinformatique » de l'Université d'Utrecht. Elle s'est orientée récemment vers les modèles d'évolution multi-échelles, les modèles à ondes spirales et les modèles hybrides automates cellulaires/équations aux dérivées partielles pour l'embryologie.

[1] [Hogeweg, P., 1978], p. 94 : "We stress that we regard these models as being of *heuristic* interest for the study of plant development." C'est l'auteur qui souligne.

[2] Voir [Blaise, F., 1991], p. 16.

[3] [Françon, J., 1991], p. 241.

[4] " 'database amplification' factor", [Smith, A. R., 1984], p. 1.

[5] "Determinism is shown to provide adequate complexity, whereas randomness is only convenient and often inefficient", [Smith, A. R., 1984], p. 1.

Avec le travail de Smith donc, on a une notion formelle qui commence à mêler et faire converger deux traditions dans un contexte d'infographie : la tradition logiciste et explicative d'une part, et la tradition géométrique et descriptive d'autre part. Cet article donne des exemples d'images engendrées par ordinateur grâce au nouveau formalisme graftal. Mais, d'une part, il ne s'agit toujours que de plantes figuratives conçues d'en haut, sans aucun souci de la conformité des parties des plantes simulées avec des entités ayant effectivement un sens d'un point de vue botanique[1]. D'autre part, Françon sent tout de suite que la combinatoire énumérative, qui est finalement la science des arbres formels, peut faire bien mieux que les L-systèmes, que les simples rapports d'auto-similarité géométrique des fractales[2] ou même que les graftales. Il sent qu'il peut apporter quelque chose de nouveau. C'est donc à cette période qu'il se lance, avec ses doctorants, dans des travaux sur ce qu'il appelle la « modélisation combinatoire » de plantes figuratives.

Synthèse d'images et fractales : engouement puis scepticisme

Nous évoquons ici les fractales dès lors qu'elles ont concerné, mais de façon très marginale, la problématique de la modélisation et de la simulation des plantes, en particulier dans la période qui nous intéresse. Françon et son école ont en effet eu à se positionner par rapport à elles. Rappelons qu'à sa sortie de l'école Polytechnique, Mandelbrot se rendit aux Etats-Unis pour travailler chez IBM avant d'enseigner, entre autres, à l'Université Yale. Fort de son expérience de chercheur en théorie du codage, en théorie de l'information puis en économétrie, il était devenu sensible au rôle du hasard dans les formes manifestées par le monde réel, dans « des choses très concrètes »[3]. Il se méfiait en cela des mathématiques construites *a priori*. Son approche était plus soucieuse du concret et ne visait pas d'emblée à plier le réel afin de le conformer à un corps de doctrine mathématique déjà constitué[4]. Il avait ainsi remarqué que beaucoup de formes réelles manifestent, à quelque échelle d'observation qu'on se place, une irrégularité constante. Autrement dit, si c'est bien le hasard qui donne forme à certains objets organiques ou inorganiques, on peut tout au moins quantifier le « degré » de hasard, c'est-à-dire le degré d'irrégularité qu'ils manifestent. Et on peut, de plus, faire l'hypothèse que ce degré d'irrégularité est conservé quel que soit le niveau d'observation. C'est ce qu'on appelle l'auto-similarité. C'était là reprendre, entre autres, les travaux sur le continu du mathématicien Georg Cantor et qui remontaient déjà à la fin du siècle précédent (années 1873-1877[5]). Une structure géométrique fut alors dite « fractale » ou auto-similaire par Mandelbrot quand elle se ressemblait à des échelles différentes. Cela revenait à

[1] [Smith, A. R., 1984], p. 6.
[2] Voir [Françon, J., 1991], p. 239 : « Je pense que la notion de système de production ou de récursivité dans la topologie d'une ramification est plus pertinente, pour la botanique aujourd'hui, que la seule auto-similarité géométrique. » Françon veut dire que, pour lui, l'accent est à mettre sur la *forme* de l'arbre, sur sa topologie, sur ses branchements et non sur ses rapports métriques. Car c'est, selon lui, à ce niveau-là que l'on peut attendre une véritable généralité de l'approche par les arbres.
[3] [Mandelbrot, B., 1986].
[4] « J'ai la conviction profonde que très souvent on perd plus qu'on ne gagne à l'abstraction forcée, à la vedette donnée à la 'mise en forme' et à la prolifération des concepts et des termes » [Mandelbrot, B., 1975, 1995], p. 11. Dans son ouvrage d'abord paru en américain en 1982, il précisera : « les nuages ne sont pas des sphères, les montagnes ne sont pas des cônes, les côtes ne sont pas des cercles, l'écorce n'est pas lisse et l'éclair ne se déplace pas non plus en ligne droite », tiré de *The Fractal Geometry of Nature*, New York, W. H. Freeman, 1982, cité par [Stewart, I., 1997], p. 308.
[5] Voir la traduction de la correspondance Cantor/Dedeking dans [Cavaillès, J., 1962], pp. 187-251.

dire que les mêmes lois aléatoires jouaient sur cette forme et la modelaient, à quelque niveau que ce soit. On comprend ainsi intuitivement que cette propriété puisse fréquemment être vérifiée dans le monde réel : elle manifeste une sorte d'indifférence de la nature au changement d'échelle. Elle est vérifiée en particulier par les côtes bretonnes, mais aussi par la plupart des côtes dans le monde.

Mandelbrot[1] a donc été amené à développer une géométrie centrée sur la notion de hasard et à en tirer un outil mathématique capable d'exprimer les régularités que le hasard présente. En 1978, il s'attacha ainsi à montrer que la forme des arbres répondait à des critères de même type. Les lois de croissance étaient remplacées par des règles génératrices, mais sans le recours à une discrétisation effective : c'était selon lui sauver la modélisation géométrique des risques d'une désintégration sous les assauts répétés des modèles discrets[2]. Il lui apparaissait qu'en fractionnant récursivement le continu, on pouvait retrouver une « mesure » de l'irrégularité des formes les plus complexes, non plus certes dans une métrique classique mais dans une dimension, la dimension non entière ou fractale. Beaucoup d'informaticiens et infographistes, séduits par la simplicité de ces règles de construction des structures complexes, se sont alors servi des fractales pour la synthèse d'images photo-réalistes[3]. On y voyait là le développement d'une mathématisation nouvelle du monde des formes. Mais ce qui fut décisif, c'est le rôle qu'a joué, dans la popularité soudaine des fractales, leur visualisation aisée sur ordinateur. De plus, leur structure mathématique récursive les prédisposait à une programmation très facile en langage évolué. Et les calculs s'avérèrent très rapides. Ce qui permit de concevoir des films d'animations en temps réel, c'est-à-dire avec des calculs effectués entre l'affichage des deux images successives. Les images purent donc ne pas être stockées en mémoire et elles permirent ainsi une interactivité : l'industrie américaine du film et du jeu vidéo promut bien entendu la recherche en ce domaine. Dans les années 1980 donc, à l'échelle mondial, les écoles d'ingénieurs et les universités furent le théâtre d'un véritable engouement pour la synthèse d'image dans la mesure où les fractales étaient très médiatiques et séduisantes, mais dans la mesure aussi où leur apparition coïncidait avec la mise sur le marché des premières stations graphiques performantes comme aussi de nouveaux écrans (Bitmap[4]) basés sur le principe des pixels, ces derniers remplaçant les écrans à balayage cavalier (de l'ancienne CAO) ou à caractères alphanumériques préfixés. Cette visualisation des fractales, d'abord sur des tables traçantes sommaires dès 1973, ensuite sur imprimante puis sur écrans à pixels, a montré au grand public un usage inédit de l'ordinateur. Il consistait à utiliser les capacités de calcul de la machine mais aussi ses périphériques pour produire des images visuellement réalistes. Il s'agissait de faire imiter la réalité à une machine en lui demandant plus que la simple impression ou recopie de l'apparence sur un support, comme c'est en revanche le cas pour une photographie. En 1986, Mandelbrot résume lui-même les réflexions que cet usage lui avait suggéré : « Si je pouvais imiter la Nature, c'est que

[1] Pour une étude des implications philosophiques du fractalisme, voir [Boutot, A., 1993].

[2] À ce titre, l'approche fractale n'est pas du côté de la simulation numérique. Contrairement à ce que l'on pourrait croire, son formalisme se présente plutôt comme une réaction contre le tout numérique.

[3] Voir l'article de Peter E. Oppenheimer : « Real Time Design and Animation of Fractal Plants and Trees », [Oppenheimer, P. E., 1985], cité par le premier article du SIGGRAPH de [Reffye (de), Ph., Edelin, C., Françon, J., Jaeger, M. et Puech, C., 1988], p. 158. Dans cet article, ce chercheur du *CGL* y défend l'intérêt des fractales pour l'animation en temps réel de scènes végétales complexes : le procédé de synthèse mathématique des fractales étant très simples, les ordinateurs sont en effet soulagés d'un grand nombre de calculs : ils sont donc bien plus rapides. Du point de vue de l'infographiste, les fractales sont donc un « truc » de programmeur intéressant.

[4] Littéralement « matrice de bits » ou « pavage de bit ». Selon Jean Françon, les écrans à balayage cavalier, pourtant très performants, ont cessé d'être construits pour des raisons essentiellement économiques : dans les années 1980, il apparut que les débouchés de la CAO industrielle n'avait plus rien à voir avec ce que promettaient la diffusion de l'informatique grand public avec ses écrans *bitmap*.

peut-être j'avais trouvé un des secrets de la Nature… » En fait, son discours séduisait d'autant plus qu'il faisait une fois de plus revivre une vieille représentation de la science conçue comme entreprise de découverte de lois de la Nature simples et universelles[1]. Le succès momentané des fractales résultait ainsi d'une coïncidence entre une vision ontologique mathématiste assez répandue et un « truc » technologique efficace.

Mais les représentations simulées par des fractales restaient le plus souvent irréalistes dans le détail. Elles manifestaient une trop forte régularité, une trop forte homogénéité interne : de façon générale, les branches d'une plante réelle ainsi que ses rameaux ne ressemblent pas exactement voire pas du tout à la plante entière, à quelques exceptions près, comme la fougère[2]. D'outil de *synthèse* d'images séduisantes qu'elles furent rapidement au départ, les fractales devinrent en fait de simples outils, parmi d'autres, d'*analyse* géométrique des formes au moyen de la notion de dimension non entière.

Néanmoins, l'approche de Mandelbrot et la popularité de ses images ont incontestablement accoutumé les botanistes, peu versés en informatique, à percevoir sous la forme végétale une allure globale tout à la fois stable et causée par des événements aléatoires. C'est donc par leur côté suggestif et potentiellement explicatif de cette caractéristique essentielle de l'architecture végétale (une allure générale constante pour une espèce donnée, bien qu'également déterminée par le hasard de l'environnement) que ces résultats mathématiques impressionneront les botanistes. Les botanistes et les architectes du végétal le citeront souvent, mais essentiellement pour mémoire, dès 1979 et jusqu'au milieu des années 1990[3].

En effet, il existe des théorèmes ou des algorithmes de combinatoire énumérative puissants qui permettent de tirer directement un arbre binaire de taille donnée dans l'ensemble de tous les arbres binaires de cette taille. Le caractère génératif et pas à pas des L-systèmes peut sembler être, sur ce point, avantageusement court-circuité. Françon oriente donc un de ses doctorants sur cette piste, Georges Eyrolles. Ce dernier obtient une bourse à Bordeaux. Françon est obligé de suivre son travail à distance. Eyrolles soutient en 1986 sa thèse de troisième cycle intitulée *Synthèse d'images figuratives d'arbres par des méthodes combinatoires*. Il s'agit bien d'une modélisation combinatoire : la conformité à la réalité botanique n'y est pas recherchée. C'est encore là aussi la commodité algorithmique et la rapidité qui restent le but avoué[4]. Ces recherches formelles sur les arbres binaires seront poursuivies plus tard, notamment à Bordeaux, avec Georges Eyrolles lui-même et avec Gérard Viennot, ainsi qu'à Besançon, avec Didier Arquès. Dans ce contexte, la notion d'« image figurative » sert à désigner les images de synthèse qui « figurent » une plante, qui font illusion pour le non connaisseur, c'est-à-dire qui ressemblent qualitativement et très globalement à une plante réelle mais qui se distinguent encore fortement des images qui seraient fidèles au détail botanique.

Or, en mai 1984, il se trouve que, dans la revue *Computer Graphics and Applications* des IEEE, paraît un article important de deux japonais, Masaki Aono et Tosiyasu L. Kunii[5],

[1] C'est sur ce point également que l'approche par modélisations fractionnées et par simulation informatique de de Reffye dépend manifestement d'une tout autre épistémologie, plus féconde et effectivement ouverte au réel, à sa véritable complexité. Cela reste vrai même si l'on se souvient que de Reffye recherche aussi des « lois de la nature ». De Reffye les cherche certes, mais Mandelbrot les a trouvées ; là est peut-être toute la différence.
[2] Voir [Oppenheimer, P. E., 1986], p. 57.
[3] Voir [Bouchon, J., 1995], p. 16.
[4] Voir [Françon, J., 1991], p. 240.
[5] [Aono, M. et Kunii, T. L., 1984].

respectivement ingénieur auprès de l'Institut de Recherche Scientifique d'IBM-Japon et enseignant-chercheur en poste au Département d'Informatique de la Faculté des Sciences de Tokyo. Ce travail approfondi et impressionnant par les images qu'il produit fait la synthèse des approches de modélisation mathématique *a priori*, qu'elles soient de type combinatoire, logiciste (Lindenmayer) ou encore géométrique (Honda et Fisher). Le but affiché par les infographistes japonais est de produire des images d'arbres très réalistes du point de vue de la botanique. Ayant montré la trop grande rigidité des L-systèmes, ils recourent au formalisme des arbres binaires et ternaires en l'associant à des règles géométriques (angles de ramification, rapports d'élongation) proches de celles de Hisao Honda. Ils ont en effet l'avantage de le connaître et de le fréquenter personnellement. Ce dernier leur a même communiqué un grand nombre des données dont on se souvient qu'il les avait glanées dans la décennie précédente auprès de ses collègues botanistes, comme Jack B. Fisher. Disposant d'un financement du Laboratoire de Recherche en Ingénierie du logiciel de la Société Ricoh, ils bénéficient également d'un matériel très performant : une station DEC VAX-11/780 fonctionnant sur un système Unix des laboratoires Bell, et un système graphique Seillac 3 doté d'une mémoire tampon étendue de 1368 x 1022 x 8. Ils programment directement en C, ce qui leur permet de concevoir un système très rapide et interactif de synthèse d'images, essentiellement à destination des paysagistes. Il faut noter qu'ils assurent le caractère très réaliste de leurs simulations géométriques par des comparaisons effectuées avec des photographies de plantes réelles, comparaisons évaluées rigoureusement au moyen de techniques statistiques. Ils calibrent ainsi leurs modèles géométriques *a posteriori*. C'est donc *par le haut*, pourrait-on dire, qu'ils assouplissent les modèles mathématiques alors que de Reffye était parti d'emblée d'une adaptation optimale *par le bas*, c'est-à-dire à partir des méristèmes. En tous les cas, ce que démontre cet article de manière remarquable, c'est que, quand bien même on voudrait conserver une approche par modélisation théorique, la solution purement combinatoire paraît déjà dépassée.

Sans doute est-ce une des raisons pour lesquels Françon s'en désintéresse rapidement juste après avoir dirigé la thèse d'Eyrolles. Car c'est toujours la réalité botanique qu'il a en vue : il souhaiterait du répondant de la part de véritables botanistes. Or, les informaticiens Aono et Kunii, par leurs calibrages statistiques et à échelle globale ne se fondent toujours pas sur une connaissance botanique précise. Là est la faille que l'on peut leur reprocher : ils travaillent encore uniquement pour l'infographie. Ils ne font pas du pluridisciplinaire, au sens de Françon. Ils pratiquent des « trucs » de programmeurs, avec une technique certes très avancée et surtout dramatiquement inaccessible à l'Université française, d'un point de vue financier. Mais, au regard de l'approche scientifique, on peut tout au moins leur reprocher d'ignorer la réalité botanique, c'est-à-dire de ne pas chercher à faire réellement de la science comme la conçoit Françon. Toujours est-il qu'à ce moment-là, ce dernier ne voit pas comment sortir du sentiment d'insatisfaction qu'il éprouve face aux modèles mathématiques *a priori* qu'utilisent massivement ses collègues.

Entre-temps, en 1985, les choses s'accélèrent de toute façon, d'un point de vue académique : Françon est nommé professeur à l'Université Louis-Pasteur de Strasbourg (ULP). Il y est chargé d'enseigner les techniques de synthèse d'image par ordinateur, matière qui n'est pas sa spécialité d'origine et à laquelle il doit mieux se former dans un premier temps. Il y prend rapidement en charge une formation doctorale en ce même domaine : peu ou prou, il entre ainsi progressivement dans la communauté des infographistes. N'oubliant toujours pas son objectif de rallier les sciences de la nature mieux que ne le font les infographistes, il décide finalement de prendre contact avec Claude Schmitt, qui est alors un de ses collègues botanistes de l'ULP, de manière à voir ce que, de leur côté, les scientifiques du végétal arrivent déjà à formaliser. Mais Schmitt travaille à l'échelle biochimique et il connaît peu les modèles d'architecture. Il conseille à

Françon de s'adresser à l'Institut de Botanique de Strasbourg et à ses collègues que sont Henri Brisse et Michel Hoff[1]. Ce sont donc ces derniers qui finissent par lui faire connaître, après bien des péripéties, les seules publications alors disponibles de de Reffye : celles de la revue *Café, Cacao, Thé*.

Ce que Françon retient de la thèse de de Reffye

C'est un choc pour Françon. Il n'en attendait pas tant. Selon lui, il y a déjà à peu près tout dans ce que propose de Reffye. C'est une véritable théorie de la croissance des plantes, de son point de vue. C'est-à-dire que de Reffye propose mieux qu'un modèle puisqu'*il réplique le détail*, ce qui est le propre d'une théorie, selon Françon, le modèle ne servant toujours qu'à faire des calculs approchés, d'après sa propre expérience en physique. À partir de ce moment-là, contre l'avis même du principal intéressé qui, pour sa part, pense être loin d'avoir accompli sa tâche, Françon soutiendra constamment, et avec un certain esprit polémique, l'idée que de Reffye est le « Newton du brin d'herbe »[2]. En 1991, dans son intervention au colloque sur *L'Arbre* de Montpellier, après avoir rapidement présenté la première approche de la simulation des plantes au moyen de processus discret à temps discret de type L-système, voici comment il s'exprimera :

« L'autre approche est celle de Philippe de Reffye (1979) qui décrit la croissance d'une plante par un système de processus stochastiques associés aux phénomènes de croissance, mortalité et ramification qui affectent la vie des méristèmes. La nature et les paramètres de ces processus sont obtenus par des connaissances précises en botanique, des observations et des mesures sur le terrain. Il s'agit là de la seule modélisation informatique qui prenne véritablement en compte la réalité botanique, qui donc dépasse la modélisation pour accéder, à mon sens, au statut de théorie de nature mathématique validée expérimentalement, au sens de la physique depuis Galilée.

Ces deux approches [L-systèmes et simulation aléatoires de de Reffye] peuvent être fondues en une seule. La présentation de cette fusion est le deuxième objectif du présent travail. Je considère en effet que la théorie des systèmes de production est aux processus discrets à temps discrets ce que la théorie des équations différentielles et des équations aux dérivées partielles est à la physique classique, c'est-à-dire l'outil mathématique de base permettant de raisonner, prouver des théorèmes et calculer. »[3]

Plus loin, il insistera encore :

---

[1] [Reffye (de), Ph, Edelin, C., Françon, J., Jaeger, M. et Puech, C., 1988], p. 158. Au cours des années 1980, Brisse et Hoff travaillent à l'établissement d'un « code informatisé de la flore de France ». Leur but est, entre autres, de pouvoir quantifier la richesse floristique d'un milieu donné par rapport à une base de données générale, cette base pouvant donner lieu à des analyses statistiques rigoureuses. Michel Hoff avait commencé en développant une base de données en botanique tropicale dans le cadre de l'ORSTOM. En 1994, ils créeront l'Association d'Informatique Appliquée à la Botanique (AIAB). Voir les actes du colloque de Grenoble « Quel avenir pour la botanique ? » de septembre 2000, à l'adresse http://sgentiana.free.fr/.

[2] Voir [Françon, J. et Varenne, F., 2001]. C'est une allusion à la célèbre phrase de Kant. Voici le passage de Kant dans la traduction d'Alexis Philonenko : « Il est, en effet, bien certain, que nous ne pouvons même pas connaître suffisamment les êtres organisés et leur possibilité interne d'après de simples principes mécaniques de la nature, encore bien moins nous les expliquer ; et cela est si certain, que l'on peut dire hardiment qu'il est absurde pour les hommes de former un tel dessein ou d'espérer, qu'il surgira un jour quelque Newton qui pourrait faire comprendre ne serait-ce que la production d'un brin d'herbe d'après des lois naturelles qu'aucune intention n'a ordonnées ; il faut au contraire absolument refuser ce savoir aux hommes », *Critique de la Faculté de Juger*, §75, [Kant, E., 1790, 1989], pp. 214-215.

[3] [Françon, J., 1991], p. 233.

« [L'objectif de de Reffye] requiert que la modélisation soit validée dans tous ses détails par des observations et des mesures (métriques mais surtout de durées d'élongation) précises sur le terrain, ce qu'aucune autre méthode n'a fait. Cette méthodologie est celle des sciences physiques. C'est pourquoi je considère que la modélisation de Philippe de Reffye est à mettre au rang d'une théorie validée expérimentalement. »[1]

Françon écrit donc à de Reffye en Côté d'Ivoire alors qu'il est déjà en poste à Montpellier[2]. Le courrier finit par lui parvenir mais ce dernier lui répond avec un certain retard. Finalement, après un contact par téléphone, de Reffye, intéressé, se rend très rapidement à Strasbourg. Françon lui fait valoir l'idée que l'infographie est dans l'impasse et qu'elle a besoin de son approche d'ingénieur pour faire pièce à tous les trucs que les programmeurs emploient pour faire vrai et qu'il juge de peu valeur. De son côté, de Reffye lui répond que son logiciel de visualisation n'avait pas été spécialement conçu pour faire concurrence aux solutions des infographistes mais que la simulation visuelle sert surtout à *prouver*, aux yeux des botanistes et agronomes, la validité du modèle informatique sous-jacent. Mais, dans ce rapprochement que lui propose Françon, il voit tout de même une forte convergence d'intérêts, même s'ils sont différents pour l'un et l'autre : accepter une collaboration serait pour lui une manière de poursuivre la modernisation et l'extension de son logiciel initial afin de voir s'il ne serait pas ainsi plus performant et donc mieux accueilli, en agronomie notamment. D'autant plus qu'entre-temps, le CIRAD a été créé et l'acronyme GERDAT va être conservé mais pour ne plus désigner qu'un département du CIRAD. Ce nom va en effet remplacer celui de « Centre Informatique » pour désigner ce département si particulier du CIRAD, par ses avantages et son lien organique directe avec la direction scientifique, et auquel de Reffye demeure rattaché : Gestion de la Recherche Documentaire et Appui Technique. C'est cette rencontre décisive qui va se concrétiser très vite : d'abord par la venue de deux doctorants en informatiques, puis par le redémarrage de la recherche en simulation architecturale et enfin par la création d'un laboratoire dédié à ces travaux au sein du CIRAD.

[1] [Françon, J., 1991], p. 242.
[2] De fait, le premier article de 1981 fait encore paraître l'adresse de de Reffye à Abidjan…

CHAPITRE 29 - Le redémarrage de la recherche en simulation architecturale (1985-1991)

De Reffye se trouve donc à Strasbourg à une époque où les étudiants de DEA d'informatique choisissent leur stage. Marc Jaeger, né en 1962, est le premier étudiant intéressé par le stage et le projet de poursuite sur une thèse proposée conjointement par l'ULP et le CIRAD/GERDAT. L'accord verbal conclu entre Françon et de Reffye est le suivant : Jaeger doit faire l'informatique à Strasbourg et la botanique à Montpellier. Il aura pour directives de reprendre les algorithmes de la thèse de de Reffye, de les programmer en FORTRAN et de fournir le plus tôt possible des images qui puissent être montrées sans délai dans un prochain colloque SIGGRAPH, en concurrence avec celles déjà obtenues par les japonais Aono et Kunii, notamment. Car il faut montrer au plus vite la valeur de cette solution. Or, voir une publication acceptée au SIGGRAPH est quelque chose d'exceptionnel pour des français : Françon sait que la plupart des propositions sont rejetées, tant la concurrence est féroce. L'enjeu est de convaincre par là non seulement les concurrents au niveau international, mais aussi les institutions nationales susceptibles de financer un projet de recherche qui exige l'achat de machines coûteuses et parmi les plus récentes qui soient. L'enjeu de cette première thèse bi-disciplinaire est donc de prouver la valeur de la solution et de la médiatiser.

En 1985, Jaeger commence alors son travail sur les machines du Centre de calcul de Strasbourg-Cronenbourg (CNRS). Mais les heures y sont payantes et le laboratoire de Jean Françon (le Centre de Recherche en Informatique de l'ULP) est peu doté, à l'instar du Laboratoire d'Informatique de l'ENS (Ulm) de son collègue et collaborateur, Claude Puech qui, lui aussi, commence à s'intéresser à la synthèse d'images. À l'époque, la recherche française et le CNRS, en particulier, ne sont pas très orientés vers la synthèse d'images : aucun budget n'existe. En 1982, de manière symptomatique, le gouvernement Mauroy avait certes mis deux milliards de francs dans l'image de synthèse, mais à la seule destination de la création artistique et de l'animation : seuls les Ministères de la Culture et de l'Industrie avaient cotisé. Or, les chercheurs ne recevaient quelque chose que si que leur Ministère de tutelle avait contribué : les chercheurs et universitaires en infographie n'obtinrent donc pas de bénéficier de cette manne puisque le Ministère de l'Education Nationale n'avait rien donné !

Françon se débrouille donc d'abord comme il peut. Au départ, Jaeger ne peut sortir que quelques images du Centre de calcul. Il travaille sur une machine servant habituellement aux biochimistes. Mais ces maigres résultats suffisent à convaincre de Reffye qu'il faut que le CIRAD investisse rapidement de son côté. Après 3 ans, Françon finira bien par obtenir une station Silicon Graphics, achetée d'occasion 1 million de francs. Mais ce sera trop tard car, entre-temps, Bichat et Sifferlen ont entendu la demande de de Reffye. Dès 1985, ils ont fait acheter par le CIRAD le matériel nécessaire, un mini-ordinateur Data General et un écran Tektronix. Et, à l'occasion d'un contrat ponctuel, il permettront que le GERDAT se fasse prêter une station Silicon Graphics avant même que l'ULP n'en possède une. Le laboratoire de Françon est donc dépassé pour des raisons financières : ce dernier conseille alors à Jaeger de s'installer de préférence durablement à Montpellier où le matériel existe. Il dirigera à nouveau cette thèse à distance… Bien évidemment, en contrepartie, un des objectifs supplémentaire de la thèse d'informatique de Jaeger au CIRAD sera de mener à un logiciel de simulation commercialisable, compatible et portable sur différentes

technologies informatiques. Conscient dès le début de l'investissement qu'il fait, le CIRAD ne perd pas ses objectifs de vue : il lui demande donc également de mener une recherche qui permette une valorisation rapide, en conformité avec son habituelle logique de fonctionnement. C'est une des raisons pour lesquelles la théorie botanique ne sera pas affinée par rapport à la thèse de de Reffye.

Création de l'AMAP et valorisation du premier logiciel : une simulation en préfixé (1987)

En 1985, afin de formaliser cette activité de recherche et d'encadrer la venue d'étudiants-chercheurs, le CIRAD crée, au sein du GERDAT, le « laboratoire de modélisation des plantes ». Françon, connaissant les us et coutumes du monde de l'informatique et de l'infographie, conseille tout de suite au CIRAD de donner un nom accrocheur au laboratoire. Il pourra servir également d'emblème au produit logiciel qui devra en sortir. De Reffye propose qu'on le baptise AMAP : Atelier de Modélisation de l'Architecture des Plantes. Il craint un peu le caractère ronflant de l'acronyme médiatique et c'est lui qui temporise et insiste pour que le premier « A » ne signifie qu'« atelier » : c'est le signe d'une modestie qu'il veut voir aussi à l'œuvre dans son équipe de chercheurs. Au départ, l'AMAP n'est donc constitué que de de Reffye, René Lecoustre (qui était rentré en même temps que lui de Côte-d'Ivoire), Marc Jaeger et Evelyne Costes, une jeune botaniste effectuant son doctorat sur l'analyse architecturale et la modélisation du litchi à l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc (USTL), à Montpellier. Cette dernière y travaille avec Francis Hallé, devenu entre-temps directeur du Laboratoire de Botanique. Elle est aux côtés du botaniste Claude Edelin qui vient de soutenir ses deux thèses à la même université sur l'architecture des conifères (thèse de 3ème cycle : 1977) puis sur l'architecture monopodiale et les formes réitérées automatiquement (thèse d'Etat : 1984). Ayant été récemment recruté à l'USTL, il peut lui aussi suivre de près le travail du GERDAT. Le rôle des botanistes de l'école de Hallé va consister d'abord à préciser et consolider les concepts de la simulation et à les étendre à de nouvelles plantes. AMAP naît donc autour d'une collaboration entre le CIRAD, l'Institut de Botanique de Montpellier, l'ULP mais aussi le Laboratoire de Recherches Informatique (CNRS) de Paris-Sud dirigé par Claude Puech. Puech sera même un des rapporteurs de la thèse de Jaeger.

Au début de leur travail commun, Philippe de Reffye et Marc Jaeger affichent le projet de continuer à privilégier avant tout le point de vue de l'arbre unique, indépendamment de son environnement et de sa physiologie. Ils renoncent pour cela à l'emploi des grammaires génératives de type L- Systèmes. En effet, les fonctions concrètes, proches des mesures de terrain, n'y sont pas adaptées[1] : « une plante se développe par ajouts successifs et irréversibles d'éléments et non pas par des substitutions d'éléments quels qu'ils soient »[2]. L'objectif essentiellement botanique de la simulation est là encore prioritaire. De plus, ils font le choix de conserver l'expression probabiliste du fonctionnement des méristèmes, telle qu'elle fut initialement développée par de Reffye. Car ils veulent continuer à tirer parti au maximum des observations sur le terrain : observer une population d'arbres de même espèce informe sur les distributions de ses lois de probabilité. Ainsi la variabilité pour un individu peut-elle être estimée et restituée quantitativement par simulation. Il ne suffit pas d'observer la croissance et l'architecture d'un individu pour pouvoir

[1] [Jaeger, M., 1987], p. 46.
[2] [Jaeger, M., 1987], p. 4. À ce sujet, l'équipe de de Reffye a coutume de dire que la tige d'une plante pousse un peu « comme le dentifrice sort de son tube quand on le presse » : lors d'une ramification, les entre-nœuds ne sont *pas remplacés* par d'autres qui seraient ramifiés. L'image d'une substitution ou d'une réécriture telle qu'elle intervient dans les L-systèmes est donc trompeuse d'une point de vue botanique. Les L-systèmes restent un modèle valant pour une approche figurative.

chiffrer ses lois probabilistes de croissance. La simulation d'un individu ne signifie donc pas qu'on a mesuré les caractéristiques d'un seul individu pour les restituer ensuite. L'ajustement de ses paramètres résume à lui seul un très grand nombre d'observations sur le terrain. Ce fait important découle de l'approche dynamique et botanique de l'architecture des arbres.

Mais le manque de précision des concepts botaniques de haut niveau (réitération, axe, unité de croissance…) interdit encore son utilisation. C'est donc au titre de méthode constructive, *bottom-up* ou « de bas en haut », que l'approche procédurale, au sens informatique du terme (procédural = programmable par ordinateur au moyen d'une série d'actions définies par des procédures élémentaires), est choisie au détriment d'une approche dite « conceptuelle » (fondée sur des classes d'objets hiérarchiquement ordonnées). Cette approche procédurale informatique reprend la construction de la plante à partir de la modélisation stochastique, donc par le détail. Le végétal se construit à partir de la définition de l'activité élémentaire des méristèmes. L'intérêt de cette remarque de de Reffye et Jaeger réside dans le fait que si l'on veut simuler par ordinateur, il faut tôt ou tard pouvoir quantifier, ramener au calcul les rapports entres les entités simulées. Or, même la classification précise mais de haut niveau et donc qualitative ou « conceptuelle » de Hallé et Oldeman n'y suffit pas. C'est pourquoi il a bien fallu pallier ce manque de précision chiffrée par l'introduction de lois essentiellement « souples » telles que le sont les lois probabilistes.

Cette nouvelle justification, avec sa nouvelle terminologie, est pour nous intéressante car elle manifeste la volonté de Jaeger et Françon de traduire dans des concepts informatiques usuels (« programmation procédurale » *versus* « programmation conceptuelle ») le sens de l'approche *bottom-up* de de Reffye qui, au départ, avait une nécessité agronomique. Ce que Jaeger veut dire, c'est qu'il serait vain que l'informaticien cherche ici tout de suite des classes d'objets et qu'il s'acharne à vouloir définir les objets à simuler de haut en bas, par propriétés, comme cela peut se faire déjà dans le langage C. Cela correspondrait sinon, de son point de vue, à quelque chose comme l'approche qualitative par les modèles architecturaux de Hallé et Oldeman dont de Reffye a montré qu'elle ne pouvait donner lieu à une immédiate quantification.

Modèles et structures de données : l'apport des langages

Dans ce cas d'une approche procédurale, on peut par ailleurs remarquer que la structure du programme conduit à un arbre : « La structure sous-jacente au niveau de ces nœuds est un arbre au sens informatique du terme. »[1] Aussi le deuxième doctorant, Frédéric Blaise, écrira-t-il encore en 1993 : « ces notions [topologie, géométrie, dynamique de croissance] se traduisent concrètement par une structuration des données et des programmes qui tend à suivre l'organisation de l'arbre lui-même. »[2] Ainsi, un programme de simulation tendrait-il, par sa forme, à représenter en l'imitant l'architecture réelle de l'arbre simulé. Il n'y aurait de simulation que s'il y a imitation de l'organisation interne.

Il reste qu'un des apports majeurs de la thèse de Jaeger consiste en la séparation nette et explicite entre la *topologie* de la plante, gérée par le moteur de croissance, et sa *géométrie*, gérée par un module autonome compatible avec une chaîne de visualisation infographique standard :

---

[1] [Jaeger, M., 1987], p. 60.

[2] [Bouchon, J., Reffye (de), Ph., Barthélémy, D., 1997], p. 317. [Reffye (de), Ph., Blaise, F., Guédon, Y., 1993] préciseront également : « les concepts botaniques utilisés et la modélisation mathématique qui en découle font que la simulation tend à reproduire le fonctionnement de la plante plutôt que sa seule forme » (p. 40.) ; et la phrase de Blaise est reprise dans les mêmes termes p. 41. Ainsi le logiciel semble réaliser un « modèle vrai » de l'arbre, au sens de J. Sauvan, (in [Sauvan, J., 1966] cité par [Legay, J.-M., 1997], p. 25). C'est-à-dire qu'il coïncide avec la réalité modélisée aussi bien du point de vue phénoménologique que du point de vue de la logique interne.

« *L'indépendance des tâches 'Simulation ' et 'Graphisme' sous-entend des structures de données adéquates pouvant d'une part recevoir des résultats de simulation et, d'autre part, s'intégrer dans une chaîne de visualisation à vocation générale.* »[1]

Plus loin :

« *De plus, la simulation numérique a obligé à penser clairement les concepts de modélisation.* »[2]

Cette précision de Jaeger est fondamentale. Sans le dire, il reprend en fait cette distinction explicite entre le topologique et le géométrique à Alvy Ray Smith et à sa façon de résoudre informatiquement le vieux problème d'interprétation géométrique des L-systèmes[3]. Elle permet de comprendre que c'est le langage évolué et structuré, le FORTRAN puis le C, qui, petit à petit, commence à prendre en charge la communication jusque là houleuse ou impossible entre les différents formalismes (topologique stricte, probabiliste et géométrique). Jaeger fait ici la même expérience que Hogeweg en 1978 : il découvre que la traduction d'un algorithme en un langage différemment structuré oblige à penser et à faire construire autrement le modèle par l'esprit comme par l'ordinateur. Les structures informatiques servent alors de lieux formels de médiation, de schèmes médiateurs entre des axiomatiques hétérogènes. Le langage C va même plus loin encore puisqu'il n'oblige pas seulement à distinguer différentes *procédures* agissant sur des données, comme le HPL, le FORTRAN ou le PASCAL, mais plutôt différentes structures d'*objets* que l'on définit formellement mais réalistiquement à partir de la liste de leurs propriétés. Dans cette problématique de simulation, Jaeger et de Reffye éprouvent donc à nouveau ce que nombre de concepteurs de systèmes experts avaient déjà vécu dès les années 1960 : une sorte de reflux critique de l'informatisation sur les connaissances et les conceptualisations. Le modèle n'est pas seulement traduit en un langage informatique. Il est clarifié, complexifié et, même ici, rendu possible dans la mixité de sa conception même, par la programmation. Ce que montre d'ailleurs très vite l'informatisation structurée dans le cas de l'AMAP, c'est que la classification très qualitative de Hallé et Oldeman serait peut-être même à réorganiser, comme le suggère déjà Claude Edelin à l'époque[4].

SIMULA, Langages C et C++ : programmation et modélisation orientées OBJET

SIMULA est un langage de simulation discrète issu d'ALGOL 60 et créé en 1964 par deux informaticiens du Centre de Calcul Norvégien d'Oslo (Ole-Johan Dahl et Krysten Nygaard). Ses concepteurs ont notamment cherché à systématiser la forme qu'avait prise une série de simulations sur ordinateurs effectuées lors de la conception du missile *Minuteman*, aux Etats-Unis,

[1] [Jaeger, M., 1987], p. 95.
[2] [Jaeger, M., 1987], p. 133.
[3] Voir [Smith, A. R., 1984], p. 2.
[4] Pour Edelin, certains modèles architecturaux de Hallé seraient plus proches que d'autres et seraient ainsi à regrouper sous quelques « super-modèles ». Le modèle informatique nous permettrait de les spécifier plus pertinemment du point de vue botanique. Voir [Jaeger, M., 1987], p. 133.

en 1957[1]. Ces simulations avaient consisté à séparer le problème très complexe de la simulation du missile en vol en « composants » hétérogènes : « composant structure », « composant frottement dans l'air », « composant trajectoire », etc. Le système informatique consistait à faire communiquer ses composants autonomes au cours de la simulation. L'intérêt était que chaque composant incorporait une expertise particulière très poussée qui ne communiquait que le strict nécessaire aux autres : le programme général avait pour simple fonction d'encadrer ce qui s'apparentait à « un groupe de spécialistes travaillant ensemble pour résoudre un problème »[2]. Mais plus que la notion anthropomorphe de « spécialiste », c'est la notion d'« objet » qui va remplacer celle de « composant » dans SIMULA. Ce langage est en effet conçu pour faciliter la description formelle des règles opératoires affectant les systèmes à événements discrets[3]. Ses concepteurs avaient auparavant travaillé dans un contexte militaire de recherche opérationnelle où la simulation de type Monte-Carlo, effectuée d'abord « à la main », avait dès 1949-1950 remplacé les techniques traditionnelles d'analyse numérique[4]. À l'époque, il y a donc une demande forte pour un « ensemble cohérent de concepts » et pour un langage de description informatique susceptible de servir directement à une approche de modélisation de type simulation Monte-Carlo[5]. Or, SIMULA introduit la possibilité d'un fonctionnement « quasi-parallèle » de différents « processus » à événements discrets. Ces processus ont la possibilité d'intégrer étroitement des « procédures algorithmiques » à côté des traitements mathématiques de manière à faciliter la représentation intuitive et donc la programmation des éléments du système total[6]. Le premier compilateur SIMULA a été en fonction sur un UNIVAC 1107 dès janvier 1965.

Le langage C a, pour sa part, été conçu par Dennis M. Ritchie et Brian W. Kernighan des laboratoires Bell, entre 1971 et 1972, pour être portable et servir autant à des tâches simples et de bas niveau (proches du langage machine)[7] que de haut niveau. En 1980, Bjarne Stroutstroup, toujours des Bell Labs, crée le C++ de manière à ce que le C permette la programmation orientée objet en prenant modèle sur SIMULA qui, entre-temps, s'est développé en SIMULA 67. Le but est alors d'exprimer le problème réel dans un langage peu abstrait et proche de celui qui est employé par ceux qui se le posent[8]. Au lieu d'une approche par lois générales qui fait l'hypothèse d'une impossible connaissance intégrale et de surplomb des processus (comme dans la première intelligence artificielle), une approche taxonomique et compartimentée est employée. Les *objets* sont définis comme des *instances* particulières de certaines *classes*. Les *classes* sont des structures de données formelles où figurent des listes d'*attributs* (caractéristiques) et de *méthodes* (comportements) qui peuvent affecter les *objets* de ces *classes*. Les *objets* communiquent entre eux par des *messages* sous forme de *services* aux autres objets (décrits dans les *méthodes*). Les classes peuvent être emboîtées : elles *héritent* alors certains de leurs attributs ou de leurs méthodes. Les objets regroupent et protègent leurs données et leurs méthodes avec une grande autonomie : ils sont dits *encapsulés*.

La programmation orientée objet a donc son origine dans la simulation de problèmes complexes mettant en relation des éléments divers et hétérogènes. Elle s'oppose d'une certaine

[1] Voir [Ten Dyke, R. P. et Kunz, J. C., 1989], p. 466.
[2] "Object-oriented programming is like having a group of specialists working together to solve a problem", [Ten Dyke, R. P. et Kunz, J. C., 1989], p. 466.
[3] [Dahl, O. J. et Nygaard, K., 1966], p. 671.
[4] [Nyggard, K. et Dahl, O. J., 1978], p. 245.
[5] "a consistent set of concepts", [Nyggard, K. et Dahl, O. J., 1978], p. 246.
[6] [Dahl, O. J. et Nygaard, K., 1966], p. 671.
[7] Il se caractérise par l'introduction des structures de contrôles, des pointeurs et de la récursivité. Voir [Bac, C., 1985-2003], p. 1.
[8] [Coquillard, P. et Hill, D. R. C., 1997], p. 154.

manière à l'approche par modèles mathématiques qui reposait tout entière sur une technique de programmation procédurale, fonctionnelle (procédure de calcul, d'analyse numérique, d'approximations[1], etc.) où des langages généraux et orientés vers les formulations mathématiques (comme FORTRAN) faisaient encore l'affaire. La modélisation orientée objet ouvre donc à une possible pluriformalisation des simulations et tend à compléter ou remplacer une conception mathématiste monoformalisée[2]. Elle *réifie*[3] ses concepts de manière à mieux répliquer le phénomène qu'elle simule.

Toujours est-il que dans cette première version commerciale du logiciel, on n'a pas encore affaire à une véritable simulation dans le sens défini précédemment, car il faudrait pour cela traiter tous les nœuds en parallèle comme c'est le cas dans la réalité. Les méristèmes d'une plante réelle évoluent de manière corrélée et non séquentielle. Le temps passe pour eux, « en même temps », si l'on peut dire. Autrement dit, il faudrait disposer d'une machine parallèle de type MIMD (*Multi Instructions Multi Datas*)[4]. Or, selon Jaeger, il n'est techniquement pas réalisable d'interconnecter plusieurs millions de processeurs jouant chacun le rôle d'un nœud de l'arbre simulé. Il reste donc deux solutions techniquement envisagées[5]. La première consisterait à simuler le parallélisme en utilisant des outils logiciels comme des échéanciers. Cette solution est en cours d'implémentation en 1987 et ne sera véritablement mise en œuvre qu'avec les travaux de Frédéric Blaise, en 1991. La solution qui est d'abord retenue par Jaeger consiste à générer le végétal nœud par nœud à un âge préfixé (fixé à l'avance). Elle est simple à manipuler et requiert peu de ressources en mémoire. L'inconvénient est double[6] : premièrement on n'obtient pas véritablement la simulation de la croissance de façon dynamique mais seulement des représentations d'étapes de croissance, deuxièmement la réalisation d'animations nécessite la reprise intégrale de la simulation pour chaque âge différent. Pendant le calcul, la forme transitoire obtenue ne doit pas être affichée car elle ne ressemble pas à un arbre réel. Cette simulation n'est donc pas encore botaniquement réaliste dans son *processus* dynamique même, bien que dans ses *résultats figés*, elle le soit assez rigoureusement. Il demeure néanmoins impossible de simuler la gêne entre axes puisque chaque axe est « calculé » jusqu'au bout avant que le suivant ne le soit. Et donc tout méristème « ignore » tout de son environnement.

Quelles sont finalement les hypothèses botaniques qui sous-tendent un traitement de la croissance en mode préfixé et quelle est leur conséquence sur le moteur de croissance ? La première hypothèse est que les caractères morphologiques et géométriques d'un nœud ne dépendent que des nœuds précédents[7], et la seconde est que la plante pousse dans un environnement parfaitement homogène. Moyennant ces hypothèses, assez lourdes, il n'est pas irréaliste de ne traiter que la suite des nœuds ayant ramifié. C'est donc ce que fait le premier « moteur de croissance » de l'AMAP. Cette expression est proposée dès le départ par Françon, sur le modèle des « moteurs d'inférences » des logiciels d'intelligence artificielle.

---

[1] En regard, il est instructif de lire les actes de la RCP du CNRS de 1966 (Recherche Coopérative sur Programme n°30), donc exactement contemporaine du travail de Dahl et Nygaard, sur les procédures ALGOL : elles ne sont dédiées qu'à l'analyse numérique. Voir [Kuntzman, J., 1967] et [Gastinel, N., 1970].
[2] Le concept et le terme même de « pluriformalisation » apparaîtront cependant plus tard et dans un autre contexte. Nous y reviendrons plus bas, en temps utile.
[3] Sur cette notion, voir [Drogoul, A., 2002a].
[4] Précision donnée par [Blaise, F., 1991], p. 56.
[5] [Jaeger, M., 1987], p. 61.
[6] [Jaeger, M., 1987], p. 61.
[7] [Jaeger, M., 1987], p. 61.

Expression générale du « moteur de croissance » en préfixé

Le moteur consiste en le parcours d'un arbre informatique préfixé. C'est lui qui gère le côté topologique de la plante. Pour chaque test (de viabilité, de croissance, de ramification…) de chaque nœud, il procède à la confrontation entre un nombre aléatoire et une probabilité définie. Le corps général du moteur de croissance est ainsi décrit par Jaeger :

« Chaque nœud subit en séquence les tests suivants :
-le test de viabilité
-si le nœud est viable, le test de croissance,
-enfin si le nœud est viable et n'est pas en pause, des tests de ramification.
Dans le cas où il y a ramification, un nouveau nœud est créé et traité ; dans le cas contraire, on traite le nœud suivant sur le même axe. »[1]

Suit alors la description du moteur. Il est itératif et non récursif (à cause du mode préfixé) et nécessite une gestion classique par pile initialisée dite « graine » :

```
«  MOTEUR
  Empiler le premier nœud « la graine »
  Tant que (la pile n'est pas vide) faire
        mêmeaxe ← vrai
        on affecte le sommet de la pile au nœud courant
        tant que (mêmeaxe) faire
              proba ← LOIS(viabilité)                    ' viabilité du nœud
              Si (rnd > proba) alors
                    On dépile                            ' le nœud est mort
                    mêmeaxe ← faux
              sinon
                    proba ← LOIS (croissance)            ' élongation du nœud
                    Si (rnd < proba) alors               ' tests de ramification
                          Pour (chaque nature de ramification) faire
                                proba ← LOIS(ramification, nature)
                                Si (rnd < proba) alors
                                      On empile un nouveau nœud
                                      mêmeaxe ← faux     'dû à l'ordre préfixé
                                Fin si
                          Fait
                    Fin si
              Fin si
        Fait
  Fait »
```
[2]

[1] [Jaeger, M., 1987], p. 67.
[2] [Jaeger, M., 1987], p. 68.

Les axes sont donc bien traités séquentiellement et non en parallèle. La ramification finit par s'arrêter grâce au test de la viabilité où entre la valeur de l'âge limite que l'on souhaite pour les nœuds[1]. Ainsi c'est quand tous les nœuds d'un axe sont morts ou ont atteint l'âge limite que le moteur passe à l'axe voisin. La solution d'une récursivité véritable n'est donc pas choisie malgré le projet déjà ancien de de Reffye en ce sens. En plus du choix d'une simulation en mode préfixé, il y a deux autres raisons à cela : ce logiciel doit pouvoir être lu par des non-informaticiens, comme le précise Jaeger, et il doit pouvoir être transportable sur d'autres machines et dans d'autres langages.

Ces raisons jouent aussi dans le choix des langages de programmation employés. La première version du programme a été écrite en FORTRAN avec une programmation structurée en modules afin de faciliter par la suite la transposition en langage C par la société SESA (Société d'Etudes en Systèmes Automatiques). Jaeger justifie l'utilisation du C pour la version commerciale de ce logiciel par le désir de proposer un logiciel de graphisme interactif, rapide, convivial et accessible aux non-botanistes[2]. Il est ainsi transportable sur Data General, Vax et IBM. Du côté du matériel, Jaeger utilise le mini-ordinateur Data General 10000SX du GERDAT pour écrire son logiciel et un écran Tektronix 4107 avec une résolution de 512 x 512 pixels pour afficher le résultat. Le programme source s'étend sur 3000 lignes et son fonctionnement nécessite un espace mémoire de 800Koctets. En revanche le résultat de la simulation peut occuper plusieurs mégaoctets en fonction de la complexité de l'architecture de l'arbre : très peu de mémoire pour le palmier, beaucoup pour certaines herbes. Enfin, le temps de calcul dépend directement du nombre de nœuds simulés. Pour 350000 nœuds par exemple, il faut 540s, soit 9 minutes. À comparer avec les 4 heures que nécessitait parfois le HP9825… Notons qu'avec de telles contraintes techniques, Jaeger ne peut pas utiliser les micro-ordinateurs personnels qui commencent pourtant à voir le jour à l'époque.

Premières applications : médiatiques

Selon l'expression d'un article collectif des membres de l'AMAP, dès le milieu des années 1980, le laboratoire tient à disposition des chercheurs de véritables « maquettes informatiques »[3]. Grâce au travail de Jaeger, ces maquettes sont visualisables en trois dimensions. Elles sont intégrées dans des scènes où peuvent figurer des bâtiments, des villes… Elles peuvent présenter de véritables jardins botaniques virtuels. En effet, pour la première fois, et à la différence des précédentes tentatives (comme celle de Aono et Kunii), des simulations de l'architecture des végétaux ont une véritable assise botanique. Certains spécialistes comme Hallé lui font confiance alors qu'ils étaient restés sceptiques face aux essais purement théoriques et *a priori* fondés sur les fractales ou les L-systèmes. Hallé n'était pourtant pas resté réfractaire aux approches informatiques. Il avait même rencontré Lindenmayer entre 1975 et 1978, lors de certaines visites à son collègue Oldeman qui était alors en poste aux Pays-Bas. Mais les deux chercheurs ne s'étaient pas du tout entendus sur les termes d'une éventuelle collaboration, en partie à cause de l'approche trop formaliste de Lindenmayer. Au contraire, Jaeger et de Reffye convainquent d'autant plus Hallé et ses élèves botanistes que leurs simulations bénéficient d'une visualisation encore nettement améliorée grâce aux nouveaux écrans. Le principe de la validation par « l'œil de l'expert » invoqué par de Reffye vaut plus que jamais.

[1] [Jaeger, M., 1987], p. 69.
[2] [Jaeger, M., 1987], p. 84.
[3] [RFF, 1995, vol. 47], p. 71.

Mais, en dehors de l'école de Hallé, l'engouement des botanistes reste mitigé, à l'époque. Les agronomes et les écophysiologistes sont encore moins séduits. Pour tout dire, le premier intérêt du logiciel de Jaeger vient surtout du fait qu'il se prête à des applications qui ne sont pas d'abord agronomiques ni même botaniques : elles sont médiatiques. Ses créateurs en sont très conscients : la valorisation en sera facilitée d'autant. La thèse de Jaeger mène ainsi à la création de films à vocation pédagogique réalisés à partir de ses simulations. On peut y voir par exemple la croissance d'un caféier décomposée et analysée en 200 étapes pour une durée de 1 minute 30[1].

Très rapidement, la médiatisation du travail de de Reffye et Jaeger est considérable. Le logiciel, résultat de cette thèse, a rapidement été vendu sur la base de contrats passés avec des sociétés spécialisées en imagerie de synthèse, dont la SESA[2] et ce, sous le nom d'AMAP, avec la licence du CIRAD. Il est présenté et attire une grande attention au Forum des Nouvelles Images de Monte-Carlo de février 1987. De nombreuses images créées avec AMAP sont alors publiées dans les revues grand public : *Pour la Science* (avril 1987)*, La Recherche* (juin 1987)*, Le Courrier du CNRS* (n° 299, spécial « imagerie scientifique »)*, Computer Graphic World* (juillet 1987)*, Science et Vie* (août 1987)[3]. Les résultats graphiques de cette nouvelle approche font ainsi beaucoup pour sa popularité et surtout pour la renommée mondiale du CIRAD. Ils lui servent en quelque sorte de vitrine ou de carte de visite. De manière symptomatique d'ailleurs, les premières images virtuelles sorties de l'AMAP servent au CIRAD pour faire des cartes de vœux. Les préoccupations agronomiques semblent alors très lointaines…

Dans sa thèse de 1987, Jaeger s'attache également à montrer que des scénarios variés d'implantation et de croissance d'arbres en jardin aménagé ou en milieu urbain sont simulables et que cela peut constituer une aide à la décision pour le professionnel en urbanisme. L'acquisition par la société SESA du programme-source matérialise le projet d'intégrer cette nouvelle méthodologie de modélisation dans les chaînes graphiques commerciales déjà existantes. Ainsi, certains logiciels de Dessin Assisté par Ordinateur (DAO) proposent rapidement les fonctionnalités d'AMAP pour la synthèse d'images.

Une valorisation de la recherche pour le moins réussie

Il n'est pas insignifiant que les premiers gros clients de l'AMAP soient des japonais. Ces derniers se servent très rapidement des images de l'AMAP dans des problématiques paysagères, de conception de jardins botaniques ou d'animation. Dans notre historique précédent, nous avions déjà compris que le Japon avait précocement développé des essais de simulation réaliste des plantes. Nous voudrions suggérer ici que ce n'est pas tout à fait par hasard. Il faut voir là bien sûr l'effet d'une certaine avance japonaise, surtout dans les technologies des nouvelles images au cours des années 1980. Mais devant les fines simulations graphiques de jardins japonais (quelque peu éthérées et hors sol par rapport à ce que proposera Jaeger en 1987) de Aono et Kunii (1984), on peut imaginer qu'une forte demande sociale en paysagisme existe dans ce pays, notamment de par le rapport singulier que ses habitants entretiennent avec les plantes. Avec moins de répugnance qu'en Occident, elles sont conçues comme pouvant résulter d'une intervention très forte de l'homme (bonzaï), d'une quasi-fabrication sculpturale et architecturale (art du *tokikata*[4] ou art des jardins idéaux incitant à la méditation). La rupture entre le naturel et l'artificiel y est donc

[1] Référence donnée par [Jaeger, M., 1987], p. 127 : *Les Films du Centaure*, réalisateur : P. de Roubaix.
[2] [Jaeger, M., 1987], p. 134.
[3] [Jaeger, M., 1987], p. 134.
[4] Signifiant « lecture de l'univers à travers le jardin ».

moins nette. Que la science de la conception artificielle, l'informatique, en permette la représentation fidèle est sans doute en soi moins choquant que pour un occidental plus rétif, quant à lui, à l'idée de reproduire une nature que l'on disait créée par Dieu[1].

La perception visuelle et esthétique que les japonais ont traditionnellement des plantes est elle aussi particulière : l'arbre est reproduit par le trait cursif de la calligraphie. Ce fait est frappant lorsque l'on observe les fines simulations de Aono et Kunii sur leur écran graphique. Que la simulation géométrique des plantes ait eu sa source au Japon surprend donc moins si l'on songe à tous ces facteurs civilisationnels[2]. Toutefois, ce qui manque aux japonais en cette fin des années 1980, c'est une plus grande fidélité à la botanique. C'est précisément ce que propose AMAP avec son module topologique intégrant l'approche par processus stochastiques. AMAP va donc bénéficier très vite de ce fort engouement.

Après les japonais, la SEITA contracte avec AMAP dans le but de réaliser des tabacs ornementaux. Puis, un bureau d'architecte paysagiste français, celui de Philippe Thébaud (agence TUP, située à la Défense), finit par acheter le logiciel. AMAP conclut également un partenariat avec l'Ecole Horticole de Lullier en Suisse pour la fourniture d'un certain nombre de copies de l'application. Au début, l'industrialisation et la commercialisation du logiciel sont effectuées en interne par AMAP[3]. Les contrats concernés peuvent atteindre quelques centaines de milliers de francs de l'époque, voire un million. Entre 1988 et 1990, les ventes pourront même rapporter jusqu'à deux millions et demi de francs par an.

De par cette capacité à valoriser un produit de la recherche, le CIRAD réussit une belle opération qui ne lui attirera pas que des sympathies. Nous y reviendrons. Du fait qu'il dispose de plus de moyens, on l'a compris, le CIRAD s'accapare vite les compétences de Jaeger qui, d'une certaine manière, échappe à l'influence de Françon. Après une année de service miliaire au cours duquel il effectue, comme scientifique du contingent, des travaux d'ingénieur en simulation et images de synthèse 3D à l'EAALAT (Ecole d'Application de l'Aviation Légère de l'Armée de Terre[4]), Jaeger est recruté au CIRAD comme ingénieur de recherche en 1989 pour poursuivre son travail. Entre-temps, Hervé Bichat rencontre le mathématicien Jacques-Louis Lions (1928 – 2001), ancien président de l'INRIA (Institut National de Recherche en Informatique et Automatique), et qui est alors professeur au Collège de France[5]. Lions est intéressé par ce que Bichat lui rapporte au sujet de l'AMAP. Et il se déplace à Montpellier pour voir les résultats sur place. C'est grâce à cette rencontre que l'AMAP obtient le prix Seymour-Cray en 1988 pour ses images de synthèse. La même année, Puech et Françon réussissent à faire accepter un premier article de l'AMAP au colloque SIGGRAPH de 1988[6]. L'année d'avant, ils avaient essuyé un refus des américains, mais le CIRAD avait tout de même payé ce qu'il fallait pour présenter un stand en dehors du colloque

[1] Voir [Dumas, R., 2002], pp. 192-229.

[2] C'est un travail de Jean-Louis Boissier qui nous permet de confirmer cette parenté entre la calligraphie extrême orientale et l'image numérique filiforme de la plante. Boissier (né en 1945) est artiste et professeur d'esthétique à l'université Paris 8. Dès 1989, devant les simulations filiformes de bambou présentées par AMAP, il croit retrouver le secret de la calligraphie chinoise. On peut renvoyer à cet extrait d'un de ses articles paru dans un ouvrage sur l'image virtuelle publié par le Centre Georges Pompidou : « Pour restituer l'allure, foncièrement mystérieuse, de cette herbe-arbre, ils [les chercheurs de l'AMAP] sont allés chercher son *li* [puissance vitale pour les chinois], et son moteur de croissance […] C'est que dans la calligraphie comme dans l'image numérique le point a un potentiel », [CCI, 1989], p. 51.

[3] Voir [Houllier, F. et Varenne, F., 2000], p. 19.

[4] On y enseigne principalement le pilotage d'hélicoptères.

[5] Spécialiste de contrôle optimal et, plus largement, des mathématiques appliquées à l'automatique, il avait été à l'origine de l'IRIA qui deviendra ensuite l'INRIA. Il avait été Président de l'INRIA de 1980 à 1984. À côté de multiples implications au plus au niveau dans des groupes industriels français (Dassault, Thomson…), il était alors Président du CNES. Il le sera de 1984 à 1992.

[6] [Reffye (de), Ph., Edelin, C., Françon, J., Jaeger, M. et Puech, C., 1988].

scientifique proprement dit. Mais être présent sur un stand et être publié, cela n'a pas la même signification du point de vue de la reconnaissance scientifique. L'année 1988 voit donc une sorte de consécration de l'AMAP dans le domaine de l'infographie.

Timides applications botaniques et agronomiques

À en croire les indications de Jaeger à l'époque, les applications agronomiques existent bien aussi et elles pourraient même être de plusieurs sortes[1]. Il y aura d'abord celles qui ne réclament pas d'extension du logiciel. Une application agronomique particulière est ainsi l'objet d'une collaboration entre l'IRCA (Institut de Recherche sur le Caoutchouc), rattaché au CIRAD, et l'AMAP. Il s'agit de fournir une bibliothèque (ou mini-flore) architecturale simulée de clones d'hévéa afin d'aider l'expert à leur *reconnaissance sur le terrain* et de prévoir leur *comportement mécanique* différencié dans le vent.

Par ailleurs, se développent des applications qui nécessitent des extensions. La réalisation de ce premier logiciel d'envergure avait déjà permis à Lecoustre de poursuivre la simulation (déjà initiée à la suite de la thèse de de Reffye) de scénarios d'attaque d'insectes. Une courte collaboration entre le CIRAD et l'INRA voit en outre l'exploitation de ce logiciel, à partir de 1986, à des fins d'évaluation de la masse foliaire des arbres[2] : « les chercheurs peuvent ainsi évaluer précisément les erreurs commises dans l'évaluation de la masse foliaire par des capteurs au sol »[3]. La simulation se propose ainsi comme une technique de vérification directe des méthodes classiques de mesure et d'estimation indirectes sur le terrain. Avec cet outil, du point de vue de l'AMAP en tout cas, une prédiction correcte des productions quelconques de toute plante peut paraître accessible aux agronomes dans un proche avenir. Et c'est bien cela qui commence à pousser l'INRA à s'intéresser aux recherches de l'AMAP. Mais, si cela est moins vrai de la direction de cet institut, la grande majorité des agronomes de l'INRA n'est pas convaincue. Pendant longtemps, le CIRAD paie le fait d'avoir délibérément et médiatiquement mis l'accent sur l'image de synthèse : les agronomes n'auront plus qu'à s'engouffrer dans la voie des critiques qui s'ouvre naturellement devant eux. Faire de belles images n'est pas faire de la science, diront-ils. De plus, la modélisation informatique a pour effet de mettre en doute certains concepts botaniques établis par l'école de Hallé : une certaine perte de sens s'installe. L'apport conceptuel n'est pas évident *a priori*. L'AMAP et les botanistes ne semblent plus présenter un front aussi solide et uni face aux agronomes en mal de modèles physiologiques.

Rigueur formelle et perte de sens

Car la simulation numérique oblige à penser avec plus de rigueur les concepts modélisés. Elle ne tolère pas l'ambiguïté puisqu'elle se fonde sur une formalisation des objets. C'est pourquoi, tous les travaux qui émanent de l'AMAP débutent avec la fixation d'un vocabulaire rigoureux pour les phénomènes botaniques considérés. Du fait qu'elle part d'une description de la genèse de la plante à un niveau inférieur à celui adopté par Hallé, l'approche de l'AMAP tend à disperser la notion de modèle architectural selon toutes ses manifestations effectives mais sans lui conférer en échange une logique unitaire. La thèse de Jaeger se fait l'écho de cette dispersion, de cette fragmentation, telle qu'elle est répercutée par l'approche informatique de type procédurale.

[1] Pour des références assez complètes à ce sujet : [Blaise, F., 1991], pp. 50-51.
[2] Ou masse des feuilles ; voir [Jaeger, M., 1987], p. 132.
[3] [Jaeger, M., 1987], p. 132.

Certains travaux alors en cours essaient de remédier à cette perte de signification, dont les recherches de Claude Edelin[1] sur « un continuum architectural ». En fait, ce que le premier logiciel AMAP montre, c'est que les botanistes doivent se remettre au travail. Nous verrons que ces tentatives pour fédérer les modèles sous une algèbre plus formalisée et unitaire reviennent périodiquement et qu'elles ne sont pas étrangères au rapport que l'AMAP entretiendra finalement avec l'approche par L-systèmes. Un essai de solution sera apporté plus tard.

Mais auparavant, il paraît manifestement plus urgent de rétablir les liens avec les agronomes, notamment si l'on ne veut pas que l'AMAP soit trop en porte-à-faux par rapport à la définition des tâches de son institution d'accueil, le CIRAD. Cela paraît possible si l'on poursuit le projet initial de Françon et de de Reffye de rendre la simulation informatique encore plus réaliste du point de vue botanique et en particulier quant à son processus de génération : il faut intégrer le réel parallélisme du fonctionnement des bourgeons. Le souci de réalisme des botanistes[2], que partage aussi Françon mais pour des raisons qui lui sont propres et que nous connaissons, pourra alors être satisfait. Cela peut sembler pour l'heure la seule voie pour une réconciliation avec les agronomes puisque l'on pourrait ensuite envisager de faire paraître les processus d'allocations de matière pas à pas grâce à la prise en compte de la photosynthèse. La maquette, étant plus réaliste du point de vue de l'histoire de la croissance, pourra devenir plus fonctionnelle aussi et moins descriptive.

Le deuxième logiciel simule le parallélisme (1991)

C'est le second étudiant de Jean Françon, Frédéric Blaise, qui va être chargé du passage à la simulation du parallélisme, entre 1988 et 1991. La réorientation vers le pragmatisme et l'opérationnel du laboratoire du CIRAD favorise ainsi l'approfondissement d'une approche de la simulation qui serait utilisable par le botaniste comme par l'agronome, quelle que soit l'esthétique des images. La preuve que l'on pouvait faire les plus belles images ayant été apportée à la face du monde de l'infographie et des bailleurs de fonds potentiels (bureaux d'études et industriels), il faut désormais convaincre les biologistes et les agronomes. Le modèle mathématique doit tirer un peu plus de leçons de la physiologie, sans s'y laisser noyer pour autant. On voit donc déjà que la fonction pragmatique du modèle (le modèle-outil), au sens de Legay, est en quelque sorte rejointe par ce biais. Mais notons bien que de Reffye accepte de s'en rapprocher *graduellement*. Là est peut-être toute la différence. Il n'avait pas pour ambition de faire que sa simulation explique d'emblée la physiologie, même localement. Mais il se trouve que c'est une fois que la description très complète de la structure est acquise que la réintégration de la fonction est envisagée.

Comme le premier logiciel traite les axes un à un et ne simule pas véritablement l'évolution parallèle des méristèmes, les collisions inter- et intra-couronne dans l'arbre ainsi que la gêne à l'illumination ne peuvent pas être prises en compte, car les méristèmes ne « savent » pas où sont ceux qui les environnent au moment de leur test de croissance. Avec cette approche en préfixé, cela signifie que l'on n'a pas encore assez discriminé, dans les probabilités des méristèmes, ce qui est dû au génotype et ce qui est dû aux conditions du milieu[3]. On ne peut donc affirmer que l'on ait de bonnes valeurs pour ces probabilités intrinsèques, même si le rendu est réaliste. Autrement dit,

[1] [Blaise, F., 1991], p. 133.
[2] Francis Hallé a aussi été un des premiers à inciter au passage à la modélisation de la gêne : voir [Reffye (de), Ph., Edelin, C., Jaeger, M. et Cabart, C., 1986], p. 234 : « [Intervention de Hallé après l'exposé transcrit] : Deux orientations seraient intéressantes : la taille des arbres et son incidence sur la production de fruits ; la gêne entre les arbres dans une forêt. »
[3] [Blaise, F., 1991], p. 58.

les probabilités locales ne formalisent pas un phénomène biologique élémentaire. Le « réalisme » doit devenir davantage botanique encore et ne pas rester de surface. Car on ne peut rigoureusement considérer la croissance d'une partie de plante comme totalement indépendante de celle des autres. Ses parties s'entr'empêchent à toutes les étapes de la croissance. Autrement dit, on n'a pas encore tiré tout le parti que l'on pouvait de la métaphore de la population dans cette idée de la plante conçue comme métapopulation de méristèmes. On n'est pas si certain d'avoir isolé des caractères génétiques assez « élémentaires ».

Au début des années 1990, de Reffye ne renonce donc pas à cette vision détaillée de la plante. Au contraire, il la prolonge et l'approfondit. Dans cette deuxième approche, il s'agit donc de simuler également les interactions incessantes à l'intérieur de l'arbre. Cela impose d'adopter un tout autre principe de programmation. Ce faisant, on ouvre notamment la voie à la modélisation des peuplements (donc des plantations et des forêts…) et non plus seulement à celles des plantes « individuelles ». Par là, de Reffye retrouve l'objectif qui avait été le sien juste après sa thèse, en 1980, alors qu'il était encore en Côte-d'Ivoire, à l'IFCC. L'enjeu est bien de simuler une dynamique de croissance de plante qui soit plus exacte sur le plan botanique mais qui ouvre également de nouvelles perspectives agronomiques notamment en foresterie[1].

Ce cahier des charges renouvelé exige encore, et plus que jamais, le recours à des spécialistes de la programmation évoluée, étant entendu qu'il faudra simuler des processus essentiellement parallèles et que l'algorithmique afférente en est encore elle-même au stade de la recherche. La culture autodidacte ne suffit décidément plus. Aussi, cette demande de compétence se fait logiquement plus pressante et la collaboration avec l'ULP de Strasbourg et l'équipe de Jean Françon se confirme avec la venue, en 1987, d'un nouveau doctorant en informatique.

La construction ordre par ordre exige une nouvelle structuration des données

Si dans la restitution de la croissance d'un arbre en mode préfixé, on traite les ramifications prioritairement, dans la construction ordre par ordre, chaque ordre de ramification est traité pour tous les axes, à chaque top d'horloge[2]. Ainsi la restitution informatique de l'arbre tend plus encore que dans le logiciel de Jaeger à ressembler à la croissance des méristèmes telle qu'elle a réellement lieu : en parallèle. Une simulation de la croissance des plantes en parallèle nécessite d'abord une structuration plus complexe des données. Ainsi les notions fondamentales de topologie, de géométrie et de dynamique de croissance « se traduisent concrètement par une structuration des données et des programmes qui tend à calquer l'organisation de la plante elle-même », écrit Blaise. Et il commente : « ainsi la complexité botanique de la plante se retrouve dans la mise en forme de la simulation, mais au profit d'une plus grande maintenabilité et d'une extensibilité plus aisée »[3].

Cette fois-ci, à la différence de Jaeger, Blaise fait le choix de représenter les entités dans des structures hiérarchisées, cela afin d'éviter la redondance informative dans la définition des entités. Il y introduit six niveaux : entrenœud, unité de croissance, axe, réitération, structure, plante. Les entités sont des *structures*, leurs liens sont des *pointeurs* au sens du langage C. Les pointeurs sont des cases de l'entité qui désignent les adresses des entités suivante et précédente. Ils permettent d'organiser des allocations, des classements ou des rangements de manière dynamique. L'entité de plus bas niveau est ici l'entrenœud et l'entité de plus haut niveau est la

[1] [Blaise, F., 1991], p. 8.
[2] [Blaise, F., 1991], p. 55.
[3] [Blaise, F., 1991], p. 61.

plante. Cette dernière structure est utile si l'on veut simuler la gêne entre plantes. Notons ici ce fait important : par rapport à la simulation de Jaeger, la rigueur botanique doit être sacrifiée quelque peu pour que la structuration des données puissent être effectivement hiérarchisée. Pour une raison de faisabilité informatique (implémentation en langage hiérarchisé), il faut systématiser certains rapports entre certains organes en sacrifiant les points de détail. Toutefois, un bon réalisme peut tout de même être maintenu désormais grâce à l'avancée conceptuelle intervenue en botanique avec l'introduction de la notion d'« unité de croissance ». En effet, à la suite des travaux de Claude Edelin, cette notion clef a entre-temps été mise en évidence par Evelyne Costes dans son travail de thèse sur le litchi[1]. En travaillant sur cet arbre, la botaniste a montré que le premier logiciel de 1987 (de Reffye et Jaeger), encore très influencé par la croissance du caféier, avait confondu entrenœud et unité de croissance[2] : le litchi ne pouvait pas être correctement simulé par le premier logiciel.

La simulation d'événements discrets et le moteur de croissance parallèle

Selon Blaise, dès lors que l'on a formalisé et discrétisé les éléments en interaction, il faut recourir à une technique de modélisation adaptée et éprouvée par ailleurs. Il s'agit de la simulation à événements discrets. Il la décrit comme une « technique de modélisation permettant de construire une abstraction de la réalité et de faire évoluer cette abstraction en fonction du temps »[3].

Nous allons décrire les particularités de ce type de modélisation afin de comprendre le choix qui a été fait. L'idée qui préside à cette technique et qui justifie sa dénomination est que les variables numériques décrivant le système sont discrètes et en nombre fini. Il en résulte trois conséquences essentielles pour la conduite de la programmation : tout d'abord, l'ensemble des combinaisons de valeurs qu'elles peuvent prendre, et qui constitue l'espace d'état de la simulation, est *a priori* fini ou encore dénombrable. La deuxième conséquence concerne la façon de traiter l'évolution du système modélisé. Cette évolution y est expliquée en termes de changements d'état. Or, étant donné le caractère discret des variables, ces changements d'états doivent eux aussi être représentés de façon discrète, puisqu'on ne peut passer continûment d'une valeur discrète à une autre. Il y a donc des *instants de changement* appelés « temps d'occurrence d'événement » ou dates d'événement où l'on admet que le système fait un saut. Le temps se trouve donc aussi discrétisé[4]. La troisième conséquence de ce traitement discret des variables peut s'exprimer par la notion d'ordre de traitement des événements simultanés. Cet ordre renvoie simplement à la décision désormais possible pour le programmeur de faire traiter dans un ordre séquentiel des événements qui ont lieu en fait simultanément. Il peut donc être parfaitement ignoré de l'utilisateur du logiciel. Cette discrétisation informatique du temps a pour essentielle qualité de permettre au programme d'« arrêter » le temps afin de traiter toutes les tâches simultanées, les unes après les autres. Le temps de la simulation est donc un temps virtuel qui se sépare du temps réel non seulement parce qu'il possède un rapport de rythme différent mais parce qu'on se permet de

[1] In *Analyse architecturale et modélisation du litchi*, USTL, Montpellier, 1988, cité par [Blaise, F., 1991], p. 181.
[2] S'appuyant sur la synthèse effectuée entre-temps par Claude Edelin, Blaise rappelle que : « La croissance en longueur d'un axe feuillé se décompose en deux phases : dans un premier temps, des entrenœuds sont fabriqués dans le méristème, puis un certain nombre de ces entrenœuds s'allongent dans un temps court […] cette croissance peut s'effectuer de façon continue ou rythmique […] la portion de tige mise en place durant une période d'élongation s'appelle une *unité de croissance* », [Blaise, F., 1991], p. 27.
[3] [Blaise, F., 1991], p. 75.
[4] [Blaise, F., 1991], p. 75.

l'« arrêter » pour réaliser des tâches parallèles. Ainsi, en toute rigueur, une machine séquentielle peut, moyennant cette technique, procéder de façon quasi-parallèle[1].

La première difficulté qu'il faut ensuite résoudre lorsque l'on opte pour ce type de simulation concerne la gestion du temps. Elle peut être de deux types : par horloge ou par événements. Il pourrait sembler naturel, étant données les idées avancées en ce sens par de Reffye, que Blaise utilise la simulation dirigée par une horloge. Dans ce type de simulation, à chaque top d'horloge incrémenté, « la liste des événements est explorée et tous les événements apparaissant à cette date sont activés ». Mais Blaise rejette cette solution « parce qu'on ne peut précisément définir les différents états de la plante au cours de sa croissance »[2]. Ce n'est pas une impossibilité technique qui est ici visée. Le problème n'est pas de type informatique. Il concerne le choix du pas de temps. Pour pouvoir réellement définir un battement minimal dans l'élaboration d'une forme naturelle, il faut que l'élaboration de toutes ses parties possibles nécessite un nombre entier positif de battements. Il faut pouvoir ainsi définir l'échelle de « temps virtuel » réaliste. Dans les faits, les rapports de rythme temporels et intrinsèques à une plante donnée sont des nombres réels. Or, bien que cela soit discutable, l'ensemble mathématique des nombres réels peut à première vue être considéré comme un concept modelé sur notre appréhension du *continuum* physique. C'est là qu'intervient la *nature* du phénomène à simuler. Le phénomène biologique se distingue par là nettement du phénomène mécanique ou industriel tel qu'il peut être conçu à l'avance ou reconstitué par CAO. Si ce phénomène n'est pas artificiel, si donc il est biologique (au contraire de ce qui a lieu dans le dessin technique de l'ingénieur mécanicien ou architecte où l'on peut faire apparaître un module), il n'y pas d'étalon simple de mesure temporelle de l'évolution puisqu'on n'a pas eu le loisir d'en choisir un. Il n'est donc pas facile d'assigner un événement minimal, c'est-à-dire de durée minimale, qui constituerait une mesure de base pour tous les autres événements[3]. Cela est dû au fait qu'on ne maîtrise justement pas la connaissance d'une hypothétique échelle minimale des phénomènes naturels jusqu'à ce point où l'on pourrait les quantifier et les ramener aux règles simples de l'arithmétique et de la logique.

Pourtant la notion d'*horloge interne* ne perd pas du tout de sa pertinence même si elle n'est pas réellement implémentée en tant que telle dans le programme. En fait, c'est la notion d'*échéancier* qui va identifier le fonctionnement du programme au battement d'une horloge interne. Dans un échéancier, on peut faire paraître des tops d'horloge réels. C'est la *simulation dirigée par événements* qui permet cela. Le temps de la simulation est alors géré par une « liste linéaire d'événements », selon l'expression de Blaise[4]. Mais comment simule-t-on le traitement simultané de plusieurs événements ? Lorsque plusieurs événements peuvent avoir lieu en même temps, ils s'appellent et se succèdent dans l'échéancier, sans modification de leur champ « date » dans la

---

[1] Pour plus de précision, voir [Coquillard, P. et Hill, D., 1997], pp. 133-145.

[2] [Blaise, F., 1991], p. 77.

[3] Ces réflexions d'ordre épistémologique sur l'existence d'un « module », c'est-à-dire sur la capacité d'une séquence élémentaire d'un processus naturel à rythmer toutes les autres qui y participent fait l'objet d'une remarque importante de [Coquillard, P. et Hill, D., 1997], p. 136 : « Lorsque le rapport entre l'échelle de temps des occurrences d'événements et le pas de temps sélectionné est très variable, il est intéressant d'opter pour une gestion du temps dirigée par les événements. » Autrement dit, il faut renoncer à la simulation dirigée par horloge. Cela semble être une limitation conceptuelle pour la production de modèles globaux à changements d'échelles. Voici comment ces auteurs définissent l'approche par événements : « Avec une gestion du temps dirigée par les événements, le temps virtuel va progresser d'une date d'occurrence d'événements à une autre. Il n'y a plus de recherche des événements à traiter entre l'instant t et t + (pas de temps), mais au contraire, il faut gérer un échéancier qui stocke les événements ordonnés chronologiquement. Avec cette approche, lorsque le modèle connaît une longue période d'inactivité, la simulation passe directement au prochain événement significatif », *ibid.*, p. 136. Pour résumer, nous dirions que, dans une simulation guidée par les événements, c'est l'ordre qui crée le temps et non le temps qui crée l'ordre.

[4] [Blaise, F., 1991], p. 76.

liste des définitions de leurs attributs. Leur ordre d'apparition, invisible à l'utilisateur, dépend donc de la manière dont on balaie l'échéancier[1].

Le choix de la gestion du temps étant fait, il convient de mettre en œuvre soit une approche *événement*, soit une approche *processus* pour le « noyau de synchronisation »[2]. Dans le premier cas, le noyau de synchronisation a pour tâche essentielle d'ordonnancer les événements suivant leurs dates absolues dans le temps virtuel. Dans le second cas, la simulation est centrée sur la notion de processus. Elle figure un ensemble de processus progressant parallèlement dans le temps[3]. Blaise fait le choix d'une « voie intermédiaire entre un noyau basé sur la notion d'événement et un noyau basé sur la notion de processus »[4]. Il ne dispose pas en effet d'un langage de programmation de processus du type ModSim II, QNAP2 ou Simula67[5] qui tous émanent de la programmation orientée objet, encore balbutiante. La programmation d'une telle solution resterait de toute façon difficile. Le choix de Blaise est donc justifié par la limitation des ressources informatiques disponibles au CIRAD mais aussi par la simplicité de l'implémentation.

La discrétisation de l'espace

Après une nouvelle gestion du temps et les choix qu'elle impose, la deuxième génération de logiciels AMAP nécessite aussi une nouvelle prise en compte de l'occupation de l'espace. Cette étape est nécessaire puisqu'il s'agit de faire gérer, par la simulation, la gène entre les parties de la plante et l'ombrage qu'elles occasionnent sur leurs voisines. Il s'agit vraiment de mettre en œuvre le fait que l'on a affaire dès la plante unique à une population d'individus qui se côtoient et se limitent mutuellement. C'est continuer à s'inscrire, pour l'AMAP, dans la lignée de l'article de synthèse de James White. Or, comme le remarque White[6], reprenant en cela une image du botaniste allemand E. Münch, une plante ne présente jamais la forme d'un « balai de sorcière » (*witchbroom*) : les méristèmes physiologiquement réunis ne sont pas indépendants. Le refus de l'image du balai figure cette idée que les branches d'un arbre ne sont pas rassemblées

[1] En 1978, dans un même contexte de simulation de formes biologiques, Pauline Hogeweg avait déjà fait face à un problème similaire : le faible réalisme du synchronisme parfait des règles des automates cellulaires. Sur une idée qui lui avait été suggérée par l'informaticien et modélisateur américain Bernard P. Zeigler, elle avait proposé de désynchroniser les L-systèmes ou les automates cellulaires (de type Ulam) en ne conservant, dans les meilleurs des cas, que des synchronismes locaux. L'approche par événements proposée par Zeigler dès 1976 lui semblait donc aussi d'emblée préférable. Voir [Hogeweg, P., 1978]. Voir également [Coquillard, P. et Hill, D., 1997], p. 160 : « La complexité liée au codage de la concurrence d'acteurs ou d'agents *en compétition spatiale au même temps de simulation* est souvent passée sous silence. En effet, que le modèle soit réalisé avec un langage de simulation implémentant des co-routines, un langage d'acteurs ou un langage de programmation général, seuls les modèles stochastiques de résolution de cette compétition sont jugés comme sérieux par les experts en simulation et les militaires que les situations de guerre confrontent au même problème. » Ce sont les auteurs qui soulignent. La question est donc ici de savoir dans quel ordre faire traiter les événements dont on considère qu'ils ont lieu en même temps. Car ces différents ordres ne donnent pas toujours des résultats équivalents : ils sont donc eux-mêmes en compétition les uns avec les autres. Dans le cas qui nous occupe, pour le traitement de la gêne entre deux unités de croissance qui pourraient paraître simultanément, se toucher, et donc créer des conflits, Blaise utilise des règles de priorités crédibles (observées) d'un point de vue botanique qui sont fonction de la situation relative et hiérarchique des bourgeons concernés dans la topologie générale de l'arbre. Mais comme il y a tout de même des cas où il n'y a pas de priorité claire, Blaise introduit finalement aussi un aléa dans le parcours de l'échéancier. Voir [Blaise, F., 1991], pp. 123-125 et 175.

[2] Ensemble de procédures qui permettent d'entretenir et de manipuler l'échéancier. Voir [Blaise, F., 1991], p. 76.

[3] Voir [Blaise, F., 1991], p. 77 et [Coquillard, P. et Hill, D., 1997], pp. 136-142.

[4] [Blaise, F., 1991], p. 79.

[5] Ces langages sont cités, avec les références, par [Coquillard, P. et Hill, D., 1997], p. 140. Plus loin, les auteurs commentent : « en conclusion sur la simulation à événements discrets, il faut rappeler que le développement d'un modèle de simulation dans un langage évolué (Fortran, C, C++, Ada, Pascal…) reste parmi les tâches de programmation les plus difficiles. », *ibid.*, p. 144.

[6] [White, J., 1979], pp. 121 et 134 : « La forme des arbres, bien qu'elle soit génétiquement déterminée, est un résultat de processus démographiques, la naissance et la mort des méristèmes. » Références de l'article de E. Münch cité par White, p. 121 : „ Untersuchungen über die Harmonie der Baumgestalt", *Jahrb. Wiss. Bot.*,1938, 86, pp. 581-673.

accidentellement, en vrac, mais que leur disposition dépend d'une *histoire commune*. Il faut donc traiter toutes les exclusions possibles : à l'intérieur d'une même plante, entre une plante et un obstacle inerte ou entre deux plantes. L'objectif principal est de simuler la croissance dans un environnement hétérogène et évolutif. Les simulations ne seront plus des maquettes de type « fil de fer ». Elles auront une épaisseur.

La solution préconisée est de poursuivre la tendance à discrétiser la nature. L'espace lui-même sera donc traité comme un amas de cubes élémentaires de côté fixe et les coordonnées géométriques des éléments de la plante seront arrondies pour tomber dans un de ces cubes : il faut logiciser le géométrique pour que logique et géométrie soient compatibles pas à pas, mais aussi pour que les calculs soient exécutables en un temps limité. En effet, les solutions de géométrie analytique, même si elles peuvent paraître élégantes et plus fidèles à la réalité des formes élémentaires (entrenœud, feuille, rameau, tige), exigent la mise en œuvre de calculs prohibitifs, étant donné le nombre d'éléments qu'il y aurait à considérer[1].

Aussi, Blaise reprend-il aux techniques d'imagerie médicale la notion d'espace voxel[2]. Le voxel est l'analogue, pour les volumes, du pixel. C'est l'unité de volume minimale visible à l'écran. Selon Blaise, qui reprend en cela les arguments de Ned Greene[3], « grâce à cet espace discrétisé, il est plus facile et plus rapide de déterminer certaines relations, telles la proximité ou l'insertion, entre des objets géométriques que par la géométrie analytique »[4] . Au fond, l'enjeu de cette discrétisation est de remplacer des relations métriques par des relations logiques de type présence/absence. Elles sont plus faciles et plus rapides à gérer pour les algorithmes qui s'occupent de la croissance ramifiée et stochastique. Il est donc utile de discrétiser très en amont et pas seulement dans la dernière phase de l'affichage sur écran bitmap. Ainsi le parallélisme du traitement (le passage incessant du topologique au métrique) est lui-même facilité. Mais il s'agit aussi de maintenir, moyennant ces conditions de modélisation, la performance de l'outil informatique disponible. On a donc affaire à une solution de compromis. Car ce remplacement est justifié par la moindre longueur des calculs mais aussi par une plus grande « facilité » conceptuelle pour le programmeur.

Pourquoi peut-on parler de plus grande facilité de conception du modèle dans ce cas ? Blaise le précise lui-même. La plupart du temps, un voxel est de nature binaire ; c'est-à-dire qu'à ses trois coordonnées discrétisées ne répond qu'une variable ayant seulement deux états possibles : « voxel déjà occupé » / « voxel non occupé ». Ainsi les conflits pour une occupation de l'espace sont-ils réduits à un principe d'exclusion des plus simples et le traitement informatique y devient facile à programmer et ultra-rapide dans son fonctionnement. Or, même si l'idée d'une simplification de ce type reste une perspective opérante, Blaise convient néanmoins que, dans le cas de la plante, « une information binaire s'avère trop primitive »[5]. On doit en effet pouvoir gérer certaines cohabitations entre certaines parties bien définies de la plante : « Dans le cas d'un arbre, lors d'une ramification, l'axe porteur [*sic*] voit automatiquement sa première unité de croissance

---

[1] [Blaise, F., 1991], p. 108.

[2] La notion de voxel vient d'une contraction de l'anglais *volume* et *element* ou pixel (*pixel* = *picture* + *element*). Elle désigne un cube qui vaut comme élément de volume d'une image numérique. Elle apparaît, dans les années 1970, dans le contexte des techniques de reconstruction volumétrique nécessaire à la tomographie à rayons X assistée par ordinateur, dite tomographie computerisée (CT, apparue en 1972). Son emploi se généralise avec le développement des techniques d'IRM dans les années 1980. Voir [Demeure, R. J., 1999], p. 108. À la fin des années 1980, le secteur de la synthèse d'images s'en empare à son tour car les écrans *bitmap* sont disponibles et les images sont alors calculées bien plus rapidement avec ce formalisme qu'avec la géométrie analytique. Voir [Greene, N., 1989], p. 175.

[3] Alors ingénieur au *CGL*. Après sa thèse de Master au *NYIT*, il est embauché par Apple en 1989.

[4] [Blaise, F., 1991], p. 108. Voir également [Greene, N., 1989], p. 175.

[5] [Blaise, F., 1991], p. 110.

appartenir, au moins en partie, au voxel déjà occupé par l'unité de croissance de son axe porteur qui a ramifié. »[1] Donc le principe du traitement de l'espace par présence/absence dans un réduit élémentaire ne suffit pas pour les arborescences sans discontinuité. Il faut que le voxel puisse signaler quel type de partie de plante l'occupe déjà afin que l'on puisse tempérer le principe d'exclusion.

Un autre problème spécifique doit être résolu par Blaise. C'est le problème de la discrétisation optimale d'un segment dans l'espace 3D. La solution qu'il propose consistera en une extension d'un algorithme classique de l'imagerie de synthèse 2D. L'intérêt de la technique retenue tient au fait qu'elle est analogue à une technique classique d'affichage de segment sur écran à pixels : l'algorithme de Bresenham[2]. Or il faut bien comprendre ici que cette généralisation ne s'impose pas d'abord dans le but d'améliorer le rendu d'une image, mais dans le but de restituer le mieux possible dans le modèle les parties discrétisées d'une plante, et ce afin d'introduire *le minimum d'erreur systématique*.

Discrétisation de l'espace et erreur systématique

Il n'existe pas de solution générale au problème du passage de la géométrie euclidienne à l'espace discrétisé. Cette difficulté est devenue classique dans l'infographie dès lors qu'il s'est agi de faire contrôler par l'ordinateur un affichage sur écran bitmap ou sur une imprimante numérique (à distinguer des anciens *plotters* ou traceurs de courbes dont le signal de commande et le tracé étaient analogiques[3]). Le problème réside dans le choix des pixels à colorier lorsque l'on veut discrétiser un segment : on peut montrer qu'il n'est pas optimal (notamment pour la discrimination de différents segments) de choisir systématiquement tous les pixels traversés par le segment. En 1965, l'ingénieur américain J. E. Bresenham a proposé un algorithme général permettant de supprimer les pixels jugés surnuméraires en faisant le moins de calcul possible[4]. C'est celui-ci que Blaise adapte au cas des voxels sans prétendre toutefois proposer un algorithme optimal, ce qui serait une tâche ardue et hors des limites de son travail : il peut compter sur des ressources en mémoire suffisantes.

On peut imaginer ici que Blaise mesure particulièrement bien le sens de ces difficultés parce que son professeur, Jean Françon, y a récemment réfléchi, avec son collègue Jean-Pierre Reveilles. Depuis la fin des années 1980, de manière assez provocante, ils proposent que les concepteurs de modèles ou de théories mathématiques passent directement à la géométrie discrète dès lors qu'ils envisagent d'utiliser l'ordinateur. Ils rappellent que l'algorithme de Bresenham *oublie* les coordonnées euclidiennes des morceaux de segment précédemment affichés : il y a donc perte d'information[5]. Or, dans certains cas, on ne doit plus considérer cela comme une simple approximation du continu par le discret, car il surgit des phénomènes de

[1] [Blaise, F., 1991], p. 110. Nous pensons que Blaise a voulu écrire ici « rameau porté par l'axe » ou « axe d'un ordre supérieur » à la place du premier « axe porteur » de cette phrase. On peut la comprendre aisément toutefois.
[2] [Gardan, 1983], cité par [Blaise, F., 1991], p. 113.
[3] Grâce à un convertisseur de signal numérique/analogique qui pouvait équiper en sortie les premiers ordinateurs des années 1950-1960.
[4] Voir [Bresenham, J. E., 1965], p. 25.
[5] [Françon, J., et Reveilles, J. P., 1990], p. 5.

propagation d'erreur d'arrondi qui ne sont pas du tout maîtrisés ni même maîtrisables en droit[1] : « le fond de l'affaire est que les théorèmes de la géométrie euclidienne ne sont pas transportés par discrétisation. »[2] Il n'y a pas d'invariance structurelle. Il n'y a pas d'isomorphisme entre la topologie ou la géométrie discrète et la géométrie euclidienne. La traduction de l'une en l'autre est toujours ambiguë. Il faut donc partir directement d'une géométrisation discrète du monde, selon eux, non pas parce que le monde est discret[3], mais parce que, à terme, on ne pourra calculer des modèles compliqués sur ordinateur, en maîtrisant les erreurs, qu'à cette seule condition : « il faut donc construire une géométrie sur des objets discrets dans laquelle on raisonne *et* on calcule rigoureusement. »[4] Cette voie de recherche en géométrie dite « discrète » s'est considérablement développée dans les années 1990, notamment dans les laboratoires de l'INRIA.

L'algorithme de notation d'un segment dans un espace voxel 3D a donc pour but essentiel d'approcher au mieux, par les structures de données informatiques, la réalité de la plante, pour que le traitement des collisions soit le plus réaliste possible. Il est ainsi significatif que ce problème d'un rendu réaliste d'un objet 3D dans un espace abstrait, et à des fins de simulation la plus fine possible, soit analogue au problème d'un rendu réaliste pour l'œil d'une image 2D sur écran. Dans ce cas précis, comme l'espérait Françon, la simulation des formes végétales permet bien d'acquérir un regard nouveau et productif sur l'algorithmique.

Enfin, dans le but de montrer que le choix du pas de discrétisation spatiale ne crée pas d'artefact par rapport au modèle qu'on voudrait lui voir simuler, Blaise procède à des calculs réitérés de simulation en ne faisant varier que ce pas. C'est par ces *expériences de simulation* réitérées et en constatant la *stabilité* du point de vue statistique des simulations obtenues qu'il en conclut que la discrétisation de l'espace est correctement adaptée aux objectifs[5]. Il faut noter que Blaise parle bien alors d'« expériences »[6]. Il teste les propriétés statistiques des simulations en utilisant un logiciel d'analyse statistique d'usage courant, SAS, comme on le ferait pour un plan d'expériences réelles. Ce travail peut être considéré comme faisant partie du stade de vérification (innocuité de l'implémentation par rapport au modèle).

La validation de la simulation dans son ensemble

Après l'exposé des choix techniques, il convient de valider une simulation, c'est-à-dire de montrer qu'elle est réaliste pour les applications que l'on envisage. Les travaux scientifiques se distinguent aussi dans leur façon de valider les modèles. Quel est le choix de l'AMAP à ce sujet et pour quelles raisons ? La méthode de validation qui semble satisfaire l'équipe de l'AMAP revient à faire simuler un grand nombre de modèles architecturaux différents et à montrer les images qui en résultent. Blaise s'exprime ainsi :

[1] Dès lors que le programme peut ne pas se terminer. Voir [Françon, J., et Reveilles, J. P., 1990], p. 4.
[2] [Françon, J., et Reveilles, J. P., 1990], p. 6.
[3] Même si Jean Françon l'affirme parfois par provocation. Voir plus précisément [Françon, J., 1997], p. 29 : « Je remarque que l'informatique nous a amenés à penser en termes de processus discrets à temps discret ; que les problèmes posés par l'informatique géométrique et graphique ont obligé les chercheurs à penser le discret, et le discret par excellence qu'est le fini, autrement : non pas comme une approximation ou un échantillonnage du continu mais en soi… »
[4] [Françon, J., et Reveilles, J. P., 1990], p. 8.
[5] [Blaise, F., 1991], p. 152.
[6] [Blaise, F., 1991], pp. 138 et 146.

«Enfin toutes les images présentées dans ce chapitre ['Résultats'] *seront autant de prétextes pour* démontrer *la compatibilité des plantes simulées et de la chaîne graphique du logiciel AMAP et la qualité de cette dernière. »*[1]

C'est une démonstration qui repose ainsi sur le caractère réaliste de certaines images de plantes. Blaise s'autorise à parler là aussi d'« expérimentations » pour désigner cette validation par le réalisme du résultat final. Mais il faut prendre garde à ne plus prendre ici le mot « réalisme » seulement au sens de ressemblance ponctuelle d'images fixes avec une réalité instantanée. Sinon on aurait affaire à ce que Françon et ses élèves appellent de simples « images figuratives ». C'est en fait tout le rendu du dynamisme de la plante, sa croissance, ses collisions, ses stratégies adaptatives lors de la présence d'obstacles, son histoire, qui font l'objet d'une évaluation par le réalisme. Ce logiciel s'astreint à donner une dynamique de croissance réaliste et pas seulement des instantanés. C'est donc le moteur de croissance lui-même qui peut être ainsi évalué et non telle ou telle image de plante.

Mais ne pourrait-on pas évaluer quantitativement la simulation ? En effet, la simulation est bien toujours de nature numérique. Elle manipule des nombres. Ainsi elle découvre et utilise des paramètres pour restituer la réalité. Une solution plus satisfaisante pour valider la simulation serait donc de retrouver dans la réalité le sens botanique de tous ces paramètres qu'il a fallu introduire et quantifier, par ajustement aux données expérimentales. Blaise a conscience de cette objection et écrit :

« Précisons toutefois que les valeurs choisies pour les différents paramètres caractérisant le comportement de la plante dans ces conditions de gêne ou d'ombrage ne sont que des valeurs expérimentales, et n'ont aucune réalité botanique ou agronomique. Ces paramètres n'ont, en effet, fait l'objet d'aucune mesure sur le terrain. Il en sera de même pour toutes les expérimentations abordées dans ce chapitre [chapitre dernier : Résultats]. *»*[2]

Plus loin, il confirme :

« Que ce soit pour le traitement de la gêne ou de l'ombrage, un certain nombre de paramètres ont été introduits pour permettre de quantifier ces phénomènes. Il est pour l'instant évident que leur définition et la valeur qui leur est attribuée ne sont vérifiées par aucune loi botanique ou agronomique. »[3]

Autrement dit, des paramètres ont été introduits dont la signification botanique demeure problématique. À leur sujet, on peut dire qu'ils sont expérimentaux bien qu'ils n'aient « fait l'objet d'aucune mesure sur le terrain ». Qu'est-ce que cela signifie ? Comment n'est-ce pas contradictoire ? Comprenons qu'ils sont expérimentaux dans la mesure où ils proviennent des mesures statistiques de terrain. Le logiciel d'ajustement des histogrammes les a en quelque sorte « extraits » ou déduits des seuls données mesurées. Ils n'étaient donc imposés par aucune réflexion théorique *a priori,* excepté par les types de lois dans lesquels on voulait qu'ils

[1] [Blaise, F., 1991], p. 153 ; c'est nous qui soulignons. Il avait déjà précisé dans le premier chapitre, p. 10 : « l'image de synthèse est un moyen puissant de rendre compte de résultats de simulations, concrets, palpables ou plus abstraits, sous des formes diverses, souvent remarquables par leur technique et toujours démonstratifs par leur présentation ».
[2] [Blaise, F., 1991], p. 153.
[3] [Blaise, F., 1991], p. 176.

interviennent. Pour autant, ils n'ont fait l'objet d'aucune mesure directe et leur valeur est calculée pour les besoins de la simulation. C'est pourquoi les paramètres de gêne et d'ombrage n'ont pas nécessairement un sens botanique. Les éléments servant à construire une simulation botaniquement réaliste n'ont donc pas nécessairement un sens botanique *a priori*. Rappelons que cette condition devait en revanche toujours valoir pour toute modélisation, selon l'épistémologie des modèles de Legay et de son école. Blaise avait déjà précisé cette limite de son modèle de la façon suivante : « nous n'avons à aucun moment l'intention de simuler l'influence du taux de lumière sur la production photosynthétique »[1]. Ce serait en effet oublier l'objectif prioritaire de ces simulations : rendre la croissance architecturale des plantes dans son réalisme. Ce serait courir le risque de produire un mauvais modèle faute d'avoir assez distingué les échelles des processus à simuler et faute d'avoir choisi des échelles de simulation réellement compatibles entre elles[2].

Néanmoins, l'usage de l'incise « pour l'instant », dans la deuxième citation, paraît confirmer un point de vue propre à l'équipe de l'AMAP sur les conséquences d'une bonne simulation. Elle signale qu'il n'est pas illusoire de croire que ces paramètres, d'abord artificiellement ou fictivement introduits, pourraient prendre plus tard une place naturelle (parce que déduite d'hypothèses sur la nature des phénomènes biologiques[3]) dans une théorie botanique plus large. Non seulement, comme on l'a vu, une simulation réaliste aurait pour effet de clarifier et de préciser les concepts botaniques, mais elle pourrait soutenir, dans certains cas, l'invention scientifique (rôle heuristique). En l'espèce, elle pourrait inciter les théoriciens à identifier des lois ou des paramètres caractéristiques, propres à figurer dans une représentation théorique. Ainsi, perce à nouveau l'idée qu'un modèle empirique très fidèle à la réalité peut devenir une aide suggestive pour l'explication scientifique. De Reffye retrouve ainsi Legay mais par des chemins indirects.

Applications et limites

Finalement, en conformité avec l'objectif visé, cette génération de logiciel, qui sera dite AMAPpara, permet de simuler la croissance secondaire (en épaisseur) du tronc et des branches par diffusion et dépôt des assimilats. Elle permet également de tenir compte des interactions arbres/milieu[4]. De plus, elle a également pour qualité d'être évolutive. Cela lui vient de la structuration relativement complexe de ses données, par rapport à la version primitive. Cette complexité est un signe positif pour les chercheurs botanistes et agronomes de l'AMAP car elle est censée refléter la complexité de la plante réelle[5]. Avec la simulation réaliste sur ordinateur, la complexité du modèle ne signifie donc plus forcément fausseté ou inutilité. L'épistémologie minimaliste du modèle (le modèle doit être minimal, donc abstractif, pour être utile) semble bien contrecarrée par ces travaux.

Les limites de cette simulation existent toutefois. Elles tiennent d'une part aux fréquentes approximations auxquelles elle a recours. D'autre part et surtout, elles proviennent du fait qu'on n'a pas encore exactement un parallélisme pur en simulation[6]. Ainsi, le fait d'avoir à balayer un

---

[1] [Blaise, F., 1991], p. 112.
[2] Sur les problèmes d'échelles dans la simulation, voir notamment [Legay, J.-M., 1997], *passim* et [Coquillard, P. et Hill, D., 1997], p. 135.
[3] Cela rappelle évidemment les remarques que de Reffye faisait, dès 1975, sur le sens biologique des lois de probabilité qu'il introduisait au titre de caractères génétiques.
[4] Bilan fait par [Barthélémy, D., Blaise, F., Fourcaud, T., Nicolini, E., 1995], pp. 71-93.
[5] Voir [Blaise, F., 1991], p. 175 : « La richesse et la souplesse de cette structuration (qui vont d'ailleurs de pair avec sa complexité) laissent toute liberté à de nouvelles applications. Enfin, n'oublions pas qu'elle n'est qu'une représentation d'une réalité botanique elle-même complexe. »
[6] [Blaise, F., 1991], p. 175.

échéancier toujours dans le même sens risque d'introduire dans l'architecture certaines régularités qui seraient des artefacts de simulation. Il a fallu, pour contrer cette fâcheuse conséquence, introduire un aléa dans le parcours de l'échéancier. Selon Blaise, cette limite est à imputer au « manque de matériel et de logiciels adéquats »[1]. Il est enfin à noter que la discrétisation de l'espace en voxels donne lieu à la recherche d'un compromis entre un coût de mémoire prohibitif et la finesse du pas. Là encore, des limitations techniques sont invoquées.

Quoi qu'il en soit, Frédéric Blaise soutient sa thèse avec ce travail en 1991 et est, par la suite, recruté comme chargé de recherche à l'AMAP.

Des retombées conceptuelles en botanique

Entre-temps, de Reffye et Jaeger continuent à populariser leur premier travail et publient un article dans *La Recherche* : « La modélisation de la croissance des plantes »[2]. Pierre Dinouard, diplômé de l'ENSICA (Toulouse), est recruté en 1989 comme ingénieur de recherche à l'AMAP. Il travaille spécifiquement sur la mise au point du logiciel initial de Marc Jaeger et donc sur un perfectionnement de la première jonction avec l'image de synthèse.

Il faut aussi noter que lors de la préparation de la thèse de Blaise, de Reffye a été incité à améliorer encore les distinctions entre les concepts botaniques. De cette époque date sa proposition de réemployer un vieux concept, proposé en 1965 par son ancien professeur de l'ENSAT, P. Rivals : l'âge physiologique du méristème. Dit de façon simplifiée, les probabilités des différentes activités du méristème dépendent en effet de sa situation dans la topologie de l'arbre (de son ordre) : il a moins de vigueur si son ordre est élevé. Donc on peut considérer qu'il naît avec un certain âge, son âge physiologique[3]. De Reffye revient progressivement à cette idée car il dispose des réflexions d'un jeune ingénieur de recherche, docteur en statistiques, qui vient d'être recruté à l'AMAP : Eric Elguero. Derrière le fonctionnement des méristèmes, Elguero[4] reconnaît tout de suite un type particulier de processus ponctuel : un processus de Poisson que l'on peut formuler comme un processus de renouvellement[5]. Comme le rapprochement avec ce genre de processus permet d'unifier les différents processus de Poisson sous une même formulation, la notion d'âge physiologique est donc réintroduite en 1991. Cet événement pour la botanique intervient un peu après que la notion d'« axe de référence » ait été également proposée par de Reffye et le botaniste Daniel Barthélémy à partir d'un travail de simulation architecturale de l'orme du Japon[6].

---

[1] [Blaise, F., 1991], p. 175.
[2] [Reffye (de), Ph., et Jaeger, M., 1989].
[3] Voir [Reffye (de), Ph., Elguero, E. et Costes, E., 1991], p. 339.
[4] Elguero ne se plaira pas à l'AMAP et il poursuivra sa carrière comme ingénieur de recherche à l'IRD (ex-ORSTOM) où il travaillera sur des modèles épidémiologiques.
[5] Le processus de Poisson repose sur la notion intuitive de hasard déstructuré. Cela revient à faire deux hypothèses : 1- les événements ont un taux constant d'occurrence (stationnarité ou homogénéité dans le temps), 2- les nombres d'événements intervenant pendant deux périodes de temps disjointes sont indépendants. Un processus de Poisson peut alors être exprimé selon le formalisme des processus de renouvellement. Ce processus de renouvellement exprime la loi qui régit l'intervalle de temps qui sépare deux événements consécutifs. Dans un processus de Poisson exprimé ainsi, les temps inter-occurrence sont distribués exponentiellement. Pour cette présentation simplifiée, nous nous sommes aidé de [Reffye (de), Ph., Elguero, E. et Costes, E., 1991], p. 335. La théorie des processus ponctuels (processus régissant des « événements ponctuels qui se produisent d'une manière aléatoire dans l'espace ou dans le temps », [Cox, D. R. et Lewis, P. A. W., 1966, 1968], p. 1) est un chapitre difficile de l'analyse statistique et de l'estimation. Il s'est développé dans les années 1960, notamment sous l'impulsion des travaux de D. R. Cox du Birbeck College de l'Université de Londres. Une des premières applications a été l'analyse de la survenue des pannes de machine.
[6] Voir [Blaise, F., 1991], p. 54.

Barthélémy avait entre-temps soutenu sa thèse de botanique[1] à l'USTL, sous la direction de Francis Hallé, en 1988. Il avait proposé la notion de « floraison automatique » pour expliquer la sexualité de quelques plantes tropicales[2]. En partie inspiré par l'idée antérieure de floraison automatique, l'« axe de référence » se présente comme un construit théorique « basé sur le regroupement et le classement de toutes les étapes de différenciation d'un arbre »[3]. Ces étapes de différenciation sont elles-mêmes fondées sur la notion d'âge physiologique et le nouveau formalisme qui lui est rattaché. L'axe de référence traduit en fait l'évolution de cet âge le long d'un axe théorique. C'est un automate qui traduit le changement de fonctionnement des méristèmes. De par son caractère automatique, récursif et général, il peut donc servir à simplifier considérablement le moteur de croissance[4] en donnant l'impression d'une grande unité (de type informatique) au-delà de la diversité des modèles architecturaux.

[1] En fait sa spécialité est « Physiologie, biologie des organismes et des populations ».
[2] Voir le résumé de [Barthélémy, D., 1988], p. 3 : « Au cours des différentes étapes qui jalonnent la vie d'une plante, la répartition des inflorescences est très précise. La floraison n'intervient qu'après l'acquisition par la plante d'un certain seuil de différenciation. Par la suite, la floraison devient plus abondante, et tend à occuper un nombre de sites croissant avec le développement de l'organisme. Cet envahissement par la floraison traduit une évolution commune à toutes les espèces étudiées. Partant de cette approche architecturale des plantes tropicales, la floraison est interprétée comme une étape du mouvement morphogénétique parcouru par la plante de la germination à la mort, et le concept de floraison automatique est proposé. »
[3] [Reffye (de), Ph., Dinouard, P. et Barthélémy, 1991], p. 251.
[4] [Reffye (de), Ph., Dinouard, P. et Barthélémy, 1991], p. 262.

CHAPITRE 30 – La deuxième convergence : avec la modélisation mathématique en foresterie (1990-1998)

Le travail de Blaise s'achève donc dans cette effervescence conceptuelle du côté de la botanique et, en particulier, du côté de l'école de Hallé. Mais les échos dans le milieu agronomique se font en revanche attendre, notamment de la part de l'INRA. En fait, dans l'année qui précède, en 1990, a été lancée une Action d'Intervention Programmée (AIP) réunissant l'AMAP et différents laboratoires de l'INRA. Il s'agit d'une décision forte de la part de la direction de l'INRA de l'époque. D'une certaine manière, elle fera violence à certaines habitudes bien ancrées chez les agronomes de cet institut. Cette décision de la tête de l'INRA est donc prise en grande partie contre l'avis de la base. Si son succès reste encore aujourd'hui à évaluer, elle a pour effet indéniable de favoriser une convergence rapide et inattendue de la simulation architecturale avec la foresterie. C'est une discipline qui a recouru pour sa part depuis longtemps à des lois quantitatives puis à la modélisation mathématique. Mais les autres secteurs spécialisés en productions végétales pratiquent aussi la modélisation et auraient aussi bien pu accueillir les méthodes d'AMAP. Or, cela n'a pas été le cas. La situation a donc été complexe.

Comme nous le montrerons ici, cette décision de politique scientifique forte, voire décisive pour le devenir de la simulation des plantes en France, s'explique tant par le contexte institutionnel que par le tournant particulier que prennent les techniques de gestion forestière au début des années 1990. Elle ne vient pas d'une séduction soudaine et irréfléchie. D'une part, il y a bien sûr le parcours et la volonté propres à certains directeurs scientifiques qui ont été à l'origine de cette décision. Mais d'autre part, il y a ce terrain favorable de la foresterie qui prépare depuis longtemps certains spécialistes de la production végétale à accueillir avec bienveillance l'approche architecturale.

Les agronomes à l'école de la simulation : l'AIP INRA/CIRAD (1990-1993)

De manière significative, il se trouve que c'est Alain Coléno qui lance l'idée de l'AIP en 1989. Entre-temps, entre 1980, date où il avait fait la connaissance de de Reffye en tant que membre du jury du concours d'entrée à l'INRA, et 1987, Alain Coléno a poursuivi son travail de directeur du secteur des pathologies végétales de l'INRA[1]. Pendant ces années-là, il a considérablement favorisé et soutenu le développement de solutions logicielles d'aide au diagnostic. Il s'est persuadé de la valeur de l'informatique dans son lien avec la modélisation des connaissances. En participant, aux côtés d'informaticiens, à la conception de logiciels, il a contribué à faire diffuser ces techniques à l'INRA. Puis il a fait former des agronomes aux techniques de traitement de l'information. Cependant, ne disposant pas pour autant d'un accueil large et adapté dans leur institut d'origine, un certain nombre de ces agronomes-informaticiens quittèrent ensuite l'INRA pour travailler dans le privé. S'il y a donc un intérêt scientifique indéniable de Coléno pour l'AMAP, il y a aussi et surtout un volontarisme constant à l'échelle institutionnelle, comme au niveau de la politique de la recherche, qui va conduire à la naissance de cette AIP.

[1] Voir notre entretien [Coléno, A. et Varenne, F., 2001], p. 4.

Evoquons d'abord ce contexte de politique scientifique plus favorable à la modélisation en général. À l'époque, en effet, le directeur général de l'INRA, Jacques Poly[1], prône une agriculture qualitative et plus respectueuse des équilibres biologiques. En juillet 1978 déjà, en réaction aux premiers excès visibles de l'agriculture productiviste d'après-guerre, il avait été l'auteur d'un rapport retentissant dans lequel il montrait la nécessité pour l'INRA de travailler à l'établissement d'une agriculture plus « autonome et économe »[2]. En particulier, à côté d'admonestations concernant les économies en énergie, en engrais ou le retraitement et la revalorisation des déchets agricoles, ce rapport engageait la recherche agronomique à « être imaginative dans ses concepts »[3]. Après sa nomination à la direction générale de l'INRA, en 1979, dans la continuité des comités DGRST (constamment renouvelés de 1972 à 1984), et dans une vision donc proche de celle qu'incarnait Jean-Marie Legay depuis une décennie, Poly avait mis en avant les pratiques de modélisation dans la mesure où elles permettaient, selon lui, de penser ensemble et de faire interagir le développement, les ressources et l'aménagement rural équilibré[4].

En 1987, Poly dirige l'INRA lorsque Coléno prend la direction du secteur des productions végétales. À l'époque, ce secteur est important puisqu'il rassemble six départements de recherche, avec environ 2500 personnes, dont 1000 chercheurs. Dès le départ, au moyen des documents de politique générale à la modification desquels il contribue, Coléno tient pour sa part à donner une plus grande place et une plus grande souplesse aux transferts des résultats de l'INRA en direction des entreprises privées. Toutefois, il y travaille à éviter qu'il y ait en ce domaine un certain détournement de l'intérêt public. Il cherche enfin à favoriser un peu plus les recherches dynamiques, à savoir celles qui sont susceptibles d'être assez rapidement valorisées. Pour lui aussi, la modélisation a son rôle à jouer. Mais, alors que Poly insiste davantage sur l'intégration de problématiques multidimensionnelles (agricoles, humaines, environnementales,…), pour Coléno, la modélisation permet surtout une conceptualisation opérationnelle, c'est-à-dire utilisable sur le terrain.

Pendant ces années, Coléno reste informé des travaux de de Reffye et voit bien le certain succès qui commence à poindre au CIRAD avec la simulation architecturale. Il cherche à communiquer cet intérêt à ceux des chercheurs de l'INRA qui modélisent déjà. À ses côtés en effet, quelques chercheurs au départ minoritaires, comme Jean Bouchon[5], commencent à s'y intéresser. On trouve aussi Jean-Marc Ottorini, chargé de recherche à l'INRA et en poste à Nancy dans le groupe « Croissance, Production et Qualité des Bois ». À la fin des années 1980, à la suite des idées du canadien Ken J. Mitchell remontant déjà à 1975, Ottorini avait développé le programme SimCoP, un « Simulateur de Croissance et de Développement de Conifères en Peuplement »[6]. Le programme informatique distinguait la croissance en hauteur de l'arbre et le développement du houppier. Il pouvait ainsi faire interagir les arbres en peuplement en prenant en

[1] Qui avait commencé sa carrière à l'INRA, dans les années 1950, en génétique animale.
[2] [Keilling, J., 1997], p. 3.
[3] [Keilling, J., 1997], p. 4.
[4] Dans ce même esprit, Poly présidera à la création, en 1979, d'un nouveau département de l'INRA : le département des « Systèmes Agraires et Développement » (SAD). Ce département sera chargé d'engager des recherches sur le développement. Son approche se voudra « systémique », au sens des « systèmes agraires » des géographes. Des savoirs techniques divers devront être intégrés au plus près des pratiques. Le SAD souffrira longtemps d'être déconsidéré par les autres départements de l'INRA : avec ses problématiques mixtes et plutôt techniques que scientifiques, on l'accuse périodiquement de ne pas véritablement faire de la recherche. Voir sur ce point [Vissac, B. et Deffontaines, J.-P., 1999], p. 2.
[5] Jean Bouchon (né en 1938) est un X-ENEF (Ecole Nationale des Eaux et Forêts). Démissionnaire du corps des Eaux et Forêts en 1963, il devient attaché de recherche, chercheur puis directeur de recherche à l'INRA. Dans les années 1980, il est en poste à la « station de sylviculture et de production forestière » de l'INRA de Nancy. Il enseigne également à l'ENGREF.
[6] [Ottorini, J.-M., 1995], p. 97.

compte la gêne. Ce travail restera toutefois longtemps isolé. Par la suite, Ottorini développera une approche de modélisation de type nettement écophysiologique. Et il se démarquera volontairement de l'approche architecturale d'AMAP.

De manière générale, les modélisateurs de l'INRA dépendent quasi-exclusivement du département de recherches forestières[1]. C'est là en effet que l'on trouve le plus gros contingent de mathématiciens de formation. Mais l'intérêt de Jean Bouchon lui-même pour l'approche du CIRAD a une histoire. Là encore, Poly a joué un rôle important aux côtés de Coléno. En 1983, en effet, il causa un électrochoc dans le département des recherches forestières dont Bouchon dépendait. Il s'était étonné que des chercheurs comme lui se soient cantonnés à établir des « tables de production » et aient ainsi abandonné la recherche plus conceptuelle. À ce sujet, l'influence de Yves Birot, alors directeur du programme « Dendrométrie et croissance des peuplements forestiers » n'est pas non plus à négliger. Birot était généticien d'origine et il était venu progressivement à la dendrométrie. Lors d'une mission d'étude aux Etats-Unis, il s'était auparavant persuadé de l'importance de la modélisation en foresterie, en particulier. Et il s'en était ouvert à Poly. C'est à ce moment-là que Poly avait convoqué Bouchon et qu'il lui avait imposé de revoir l'orientation comme l'intitulé de son programme de recherche : selon lui, il fallait abandonner les termes de « sylviculture » et de « dendrométrie » qui accusaient un côté purement technique pour préférer ceux de « croissance, développement et production des arbres »[2] pour lesquels la modélisation devait jouer le rôle principal.

Après ce ferme « coup de semonce »[3], Bouchon est tout de même promu, en remplacement de Yves Birot, directeur coordonnateur du programme qui devait dès lors s'intituler « croissance des arbres, dynamique et production des peuplements forestiers » de l'INRA. Birot est quant à lui nommé directeur du département des recherches forestières.

Avec ses collègues comme avec ses doctorants, dont le jeune François Houllier issu, comme lui, du moule X-ENGREF, Bouchon se livre à un gros travail de bibliographie et de réflexion. À l'encontre de la génération précédente qui privilégiait l'approche purement biologique pour les questions de sylviculture, Bouchon se persuade rapidement lui aussi que l'avenir appartient à la modélisation mathématique. En foresterie, l'exemple lui vient notamment des modèles de productions et de croissance qui sont utilisés comme outils de gestion aux Etats-Unis et au Canada dès les années 1960. La modélisation sert selon lui à rationaliser la sylviculture et à permettre des prédictions vérifiables[4]. À l'ENGREF, au début des années 1980, il enseigne toujours les tables de production[5] mais aussi les modèles mathématiques qui sont disponibles dans la littérature ou à la conception desquels il a participé. Mais ce sont encore essentiellement des modèles statistiques ou des modèles théoriques calqués sur les principes de la biologie des populations.

---

[1] Qui dépend lui-même du secteur des productions végétales. Dans un entretien publié, Jean Bouchon rappelle que « la biométrie à l'INRA a été créée par des forestiers et notamment par des forestiers polytechniciens. Les besoins en mathématiques du secteur dendrométrie ont été importants dès le début alors qu'ils étaient ressentis moins vivement ailleurs. Les statistiques supposaient des moyens de calcul importants », [Bouchon, J. et Poupardin, D., 1995], p. 103. On conçoit ainsi que les « forestiers » de l'INRA aient été plus réceptifs à l'approche de de Reffye.

[2] [Bouchon, J. et Poupardin, D., 1995], p. 105.

[3] Selon les termes de Bouchon lui-même [Bouchon, J. et Poupardin, D., 1995], p. 107.

[4] Pour ces informations, nous nous sommes appuyé sur [Houllier, F. et Varenne, F., 2000], pp. 3-7.

[5] Les tables de production sont utilisées en foresterie depuis la fin du dix-neuvième siècle. Elles apparaissent d'abord en Allemagne avant de se diffuser très tardivement, en France, dans la décennie 1963-1973 (voir [Bouchon, J. et Poupardin, D., 1995], p. 104). Ce sont des résumés tabulés, éventuellement mathématisés, de la trajectoire moyenne d'un peuplement forestier sur une station. Les variables y sont exprimées en fonction de l'âge du peuplement. Ce sont le volume, la hauteur et le diamètre moyen des arbres. L'objectif est essentiellement économique.

Or, il se trouve que Bouchon avait lui aussi fait partie du jury qui avait refusé l'entrée de de Reffye à l'INRA. Avec Coléno, il avait été l'un des seuls à l'avoir soutenu. Au cours des années 1980, il reste donc lui aussi en contact assez constant avec de Reffye. Plus que Coléno encore, et surtout lorsque son intérêt pour la modélisation est relancé par l'intervention de Birot et Poly, il veille à disposer de toutes les publications d'AMAP dès leur parution. De fait, il n'est pas très étonnant que Bouchon soit un des premiers à demander explicitement que l'INRA s'intéresse à la modélisation architecturale : il pressent lui aussi que quelque chose d'important se passe au CIRAD en matière de modélisation et que l'INRA doit suivre.

En cette fin des années 1980, de son côté, Coléno tente donc d'engager fortement ses collègues écophysiologistes du secteur végétal à abandonner leur polarisation sur les modèles de fonctionnement restreints et à échelle locale, pour essayer d'intégrer les données de l'architecture végétale, architecture dont on sait combien elle joue dans le fonctionnement global de la plante. L'objectif est notamment d'améliorer la nature des modèles opérationnels dans le cas des forêts hétérogènes, c'est-à-dire en particulier dans les forêts non mono-équiennes[1]. De surcroît, il apparaît de plus en plus que les modèles compartimentaux habituels des écophysiologistes sont incapables de prédire les changements de comportement de la plante dans des situations de compétition ou de taille (arboriculture, sylviculture). Ils ne peuvent pas non plus préciser où exactement la matière produite se répartit dans l'arbre, ce qui est pourtant fondamental pour le contrôle des productions végétales. Mais Coléno ne parvient pas à inciter, de l'intérieur, les écophysiologistes de l'INRA à franchir ce pas.

Donc, il va procéder autrement. À partir de 1989, il entre en contact avec de Reffye. Il lui donne son avis au sujet de la convergence qu'il croit désormais possible : il faudrait apporter des considérations physiologiques aux simulations architecturales d'AMAP pour les faire servir plus amplement aux sciences du végétal. Cela semble tout à fait en cohérence avec les travaux de Blaise de l'époque. Et il y a des fonds importants qui peuvent être débloqués du côté de l'INRA. De Reffye est évidemment très intéressé. Il donne son accord de principe sur une collaboration d'abord ponctuelle.

L'appel d'offre officiel

En 1991, après ces premiers contacts informels, l'INRA procède donc à un appel d'offre afin d'aider au « développement de recherches sur la simulation et la modélisation de l'architecture des arbres fruitiers et forestiers »[2]. Cet appel d'offre se fait dans le cadre d'une Action d'Intervention sur Programme (AIP) qui peut rassembler des laboratoires de l'INRA et d'autres institutions. Les chercheurs qui répondent favorablement à cette AIP dépendent, pour une part, des Départements d'Amélioration des Plantes (Arboriculture Fruitière) et des Recherches Forestières de l'INRA, pour l'autre, du Laboratoire de Modélisation de l'Architecture des Plantes du CIRAD. Cette action se prolongera jusqu'en novembre 1993, date à laquelle se tiendra, à Montpellier, un colloque de synthèse[3]. La collaboration de l'équipe de modélisation du CIRAD est bien sûr ouvertement et « vivement souhaitée ».

Elle est souhaitée ; pourtant elle ne rencontre pas l'unanimité parmi les chercheurs de l'INRA. Tout d'abord, ils ont parfois l'impression qu'une institution semi-privée bénéficie par là

[1] Hors plantations, où les arbres ne sont donc pas nés la même année.
[2] Voir [Bouchon, J., 1995], p. 7.
[3] Colloque du 23-25 novembre 1993 qui a fait l'objet de deux publications séparées : [Bouchon, J., 1995] et [Bouchon, J., Reffye (de), Ph., Barthélémy, D., 1997].

injustement d'une manne publique. Et en effet, sur le budget de l'AIP qui s'élève à 3 millions de francs de l'époque, Coléno décide d'en octroyer 2 aux équipes de l'INRA et 1 à l'AMAP. Cela revient à donner 1 million de francs au CIRAD... Mais au-delà de cette rivalité public/privé, des contestations d'ordre scientifique et épistémologique se font jour. Nous tâcherons de rendre compte de ce premier rapprochement entre l'INRA et l'AMAP en nous posant quelques questions directrices. Nous pensons en effet que cet épisode est, à plus d'un titre, révélateur des positions de chacun dans le débat sur le rôle de la simulation informatique face à la modélisation en général. Quelles sont en effet les raisons scientifiques précises pour lesquelles l'INRA et, en particulier, le département des recherches forestières, sollicitent l'aide du laboratoire d'architecture des plantes du CIRAD et ce, malgré le nombre respectable des laboratoires de son ressort qui sont déjà spécialisés en modélisation de la production végétale ? En quoi cela suscite-t-il des tensions ? Sur quels points les critiques formulées par les chercheurs de l'INRA à l'encontre de l'approche AMAP portent-elles ? Quels sont alors les arguments qu'apportent, à l'appui de ce rapprochement, les membres[1] du comité de pilotage ? Quelles seront enfin les conséquences de cette collaboration ? Telles seront les orientations des réflexions qui vont suivre.

Les raisons scientifiques de la sollicitation de l'INRA[2]

Précisons tout d'abord que, jusqu'au début des années 1990, les modèles de l'AMAP restent tributaires de leur origine, malgré la diversité de leurs applications. Ils ont été conçus dans le souci de restituer avec finesse la variabilité de la dynamique architecturale, dans un contexte de reconnaissance du génotype. Ils ont leur source dans le souci d'une maîtrise des clones sur le terrain et d'une reconnaissance fine de prédicteurs, c'est-à-dire d'indices architecturaux capables de révéler *a priori* le devenir de la plante. Ces modèles rejoignaient donc principalement des préoccupations de biométrie, c'est-à-dire de mesure précise des formes vivantes, dans une perspective au départ agronomique et d'amélioration des plantes. Ils n'étaient pas conçus prioritairement pour un usage en foresterie, c'est-à-dire en gestion de production de bois.

De leur côté, les dendrométriciens, spécialistes de la production ligneuse, avaient développé à l'INRA, et ailleurs[3], des modèles de plus en plus fins selon une évolution compréhensible. L'origine et l'histoire scientifiques et techniques de ces modèles sont à restituer brièvement ici de façon à ce qu'on saisisse plus précisément l'intérêt que porte le département des recherches forestières de l'INRA, au début des années 1990, aux recherches de l'AMAP.

Au 19ème siècle, les dendrométriciens s'étaient d'abord contentés de modèles de production ligneuse à l'échelle de peuplements moyens et homogènes. Les tables de production utilisées au début du 20ème siècle étaient encore essentiellement empiriques et reposaient sur le comportement dendrométrique globale d'un peuplement. Ces modèles de peuplement concernaient des futaies régulières et monospécifiques[4]. Progressivement et dès la fin du 19ème siècle, les sylviculteurs ont appris à pratiquer sur le terrain divers types d'éclaircies. Cette pratique s'est amplifiée au 20ème siècle grâce aux progrès des outils et machines en usage en foresterie. C'est elle qui a été décisive dans l'amorce d'une conception de nouveaux modèles. Il faut en effet

[1] Françoise Dosba - INRA Bordeaux DGAP, Philippe de Reffye – AMAP/CIRAD Montpellier, Jean Bouchon - INRA Nancy, Unité de Recherche sur la Croissance, la Production et la Qualité des Bois.
[2] Dans tout ce paragraphe, nous nous appuierons sur la présentation que Jean Bouchon fait du contexte de l'AIP, *in* [Bouchon, J., 1995], pp. 7-16.
[3] Voir [Bouchon, J., 1995], pp. 17-25 : « Une brève histoire de la modélisation de la production des peuplements forestiers : place des méthodes architecturales. »
[4] À une seule espèce d'arbre.

rappeler qu'au 19ème siècle, « les éclaircies étaient souvent très faibles et par le bas » et que « le thème de l'influence de la sylviculture sur la production du peuplement et la croissance individuelle n'était donc pas central »[1].

Au contraire, la seconde moitié du 20ème siècle a également vu le développement de dispositifs expérimentaux de suivi précis et permanent des peuplements. De nouvelles pratiques sylvicoles se développèrent. Elles réclamaient la conception de lois quantitatives adaptées. Les dendrométriciens n'ont pas d'abord renoncé à l'approche par le peuplement mais ont introduit, à partir des années 1950, des notions de variations de densité de plantation qui ont conduit à l'introduction d'équations différentielles ou d'équations aux dérivées partielles dans des modèles de production ligneuse.

Cela n'était qu'une étape. Au cours des mêmes années 1950-1960, des données précises et considérables, émanant d'inventaires forestiers régionaux et nationaux d'Amérique du Nord, rendaient de toute façon caduque l'approche par peuplement homogène. Il fallait faire face à toutes ces données hétérogènes en essayant de leur donner un sens, d'y trouver de l'ordre. Le raisonnement à partir d'un peuplement d'arbres n'était plus suffisant. Les dendrométriciens, nord-américains principalement, ont alors opté pour les modèles d'arbre, c'est-à-dire pour des modèles considérant l'arbre dans son individualité, avant tout peuplement. C'est ainsi que l'on dut introduire des caractéristiques architecturales dans la considération du fonctionnement physiologique de l'arbre[2]. On ne pouvait se passer de considérer le compartiment aérien qui fait notamment intervenir la forme générale du houppier. Ainsi, progressivement, s'est imposée la nécessité de recourir à une représentation quantitative précise et prédictive de l'architecture des arbres. Au début des années 1990, nous en sommes donc là, quand Jean Bouchon et François Houllier écrivent :

« …il ressort d'abord que le niveau d'organisation privilégié par les dendrométriciens est bien celui du peuplement, mais que la réponse aux problèmes qui leur sont soumis à ce niveau passe de plus en plus par des études à des niveaux plus fins (arbre, compartiments de l'arbre, branches) : l'objet d'étude est donc rarement l'arbre seul ou le peuplement seul, mais presque toujours l'arbre au sein d'un peuplement*. Il apparaît ensuite qu'ils s'intéressent depuis longtemps au développement aérien et aux relations qu'il entretient avec la production ligneuse […] La plupart des modèles modernes incluent donc des informations sur le compartiment aérien : extension du houppier, masse foliaire, dimension des branches, etc. […] Le besoin d'une meilleure description et d'une meilleure représentation existe dans plusieurs domaines : […] l'analyse de la mise en place de l'architecture est nécessaire pour comprendre, puis prédire, l'élagage naturel ou l'apparition de défauts singuliers (fourches, grosses branches) ; l'assemblage de modèles de processus (transfert radiatif, contact entre arbres, production – diffusion – consommation des assimilats) nécessite de disposer de maquettes architecturales des arbres. »*[3]

En fait, comme Bouchon le fait remarquer, la situation française n'est pas si différente de celle des américains si l'on rappelle que 70% de la surface des forêts françaises sont occupés par des peuplements mélangés[4]. Dans cette AIP, les dendrométriciens français sont donc eux aussi

[1] [Bouchon, J., 1995], p. 18, note 1.
[2] Voir [Hesketh, J. D. et Jones, J. W., 1976], p. 242 : « Various modeling activities have generated long lists of needed information, much of which concerns details of morphogenesis in the species modeled. »
[3] [Bouchon, J., 1995], p. 23.
[4] Source : [Bouchon, J. et Poupardin, D., 1995], p. 114.

en recherche d'un modèle intégrateur qui aurait pour fonction d'assembler les modèles déjà existants et de les faire communiquer. Contre les écophysiologistes toujours prompts à compartimenter les processus dans l'espoir très hypothétique de pouvoir un jour réintégrer ces compartiments isolés, Bouchon encourage à adopter une approche holistique[1]. Car ces sous-modèles pris séparément ne donnent toujours pas les résultats espérés.

On attend donc du modèle de simulation de l'AMAP qu'il remplisse une fonction assez nouvelle : en l'occurrence qu'il serve de « maquette » support pour ces modèles physiologiques, que la structuration de ses données servent de réseau de communication botaniquement « réaliste » entre les entrées et les sorties des sous-modèles physiologiques. La simulation est donc incitée à servir de modèle squelette, dans ce cas précis. Selon Bouchon, il apparaît qu'il ne faut pas penser la simulation comme un modèle semblable aux autres. Elle jouerait un rôle qui la placerait au premier rang des modèles. Attention à bien noter que cette remarque ne prétend pas valoir en général pour toute simulation.

En fait, d'où vient cette faculté que possède la simulation architecturale de supporter tous les autres modèles et de les fédérer ? Qu'est-ce qui en fait la valeur ? Selon Bouchon, la simulation n'a de valeur pour les dendrométriciens que parce qu'elle est aussi et d'abord, dans notre cas précis, un modèle de la croissance architecturale. En effet, dans la réalité, l'architecture végétale semble bien avoir pour fonction de fédérer les phénomènes physiologiques de la plante, même si elle-même n'est pas facilement réductible à ce type de phénomènes. Tel est donc le cœur de la réflexion que mènent quelques uns des responsables de l'INRA face aux résultats du CIRAD. Le rôle éminent de la simulation n'est reconnu que parce qu'elle concerne un « compartiment » éminent de la plante : son architecture. La simulation n'est pensée comme *architecture des modèles végétaux* que parce qu'elle est également un *modèle de l'architecture végétale*[2].

Or, les modèles répondant à de telles exigences n'existent qu'au CIRAD et c'est ainsi que les responsables de l'AIP ont, en dernière analyse, justifié cette collaboration avec l'AMAP. Pendant un moment, cependant, le programme de « croissance, développement et production » dirigé par Jean Bouchon avait cru pouvoir bénéficier des concepts et techniques développés par le département d'amélioration des plantes et d'arboriculture fruitière de l'INRA. Mais, même si dans les deux cas, l'architecture doit être prise en compte, les protocoles de l'arboriculture visant à optimiser la production en fruit (coupes, tailles, éclaircies…) ne sont pas les mêmes que ceux qu'il faut mettre en œuvre en sylviculture où c'est la production ligneuse qui est privilégiée. De surcroît, l'arboriculture, en se raffinant, doit elle même promouvoir l'approche par simulation architecturale. D'où les deux pôles moteurs d'une véritable jonction entre l'INRA et l'AMAP : arboriculture et sylviculture.

---

[1] [Bouchon, J. et Poupardin, D., 1995], p. 114 : « Je suis, pour ma part, un ferme partisan du holisme, de l'approche globale, même si cette position épistémologique est souvent difficile à tenir. » Plus loin, Bouchon explique que cette difficulté tient principalement au fait qu'il est plus valorisant, si l'on veut faire une bonne carrière dans la recherche, de se concentrer sur un problème restreint où des résultats menus seront indiscutables et publiables bien qu'ils soient très peu utilisables sur le terrain. Voir *ibid.*, p. 115 : « Le réductionnisme paie plus, en tout cas, au niveau des concours […] Ce qui est toutefois certain dans le contexte actuel, c'est qu'inciter les jeunes à adopter une démarche globale, c'est les condamner à faire une croix sur leur carrière. »

[2] Voir [Bouchon, J., 1995], p. 10 : « Les recherches sur l'architecture semblent donc justifiées soit comme point de passage obligé pour développer des modèles fonctionnels, soit parce qu'on considère l'architecture comme un objet de recherche en lui-même ».

Le rôle de l'AMAP dans les projets retenus

Les membre du comité de pilotage de l'AIP partent ainsi du principe que c'est la méthode développée par l'AMAP qui permettra précisément de « relier les aspects biologiques (botaniques), métrologiques (mesure et description des plantes), mathématiques (estimation des paramètres, théorie du renouvellement) et informatiques »[1]. Ils attendent ainsi de faire bénéficier la recherche en modélisation forestière de trois apports positifs qu'ils décrivent de la sorte :

« *- une discipline descriptive essentielle pour savoir de quoi on parle,*
- une méthode d'observation, de mesure et d'organisation des données,
- un langage commun et parfaitement défini. »[2]

Autrement dit, c'est aussi une méthodologie au sens large qu'ils attendent des développements de la simulation. Ils attendent d'investir par là un terrain d'entente minimale entre disciplines de la foresterie. Il s'agit bien d'un terrain de convergence au sens fort. La simulation architecturale semble appelée à devenir un outil standard de communication entre chercheurs, au même titre que les mathématiques en physique, bien qu'elle ne soit pas de même nature. Le rôle prévalent de l'architecture est encore reconnu par Jean Bouchon et Françoise Dosba de l'INRA de Bordeaux, dans leur conclusion des actes du colloque : « L'architecture est à l'analyse de la croissance et du développement des arbres ce que la botanique est à l'écologie. »[3]

Cependant ce rapprochement n'est pas sans poser des problèmes. D'une part, la forme que prend cette collaboration peut sembler étonnamment directive par rapport à d'autres types d'échanges scientifiques. La désignation elle-même est révélatrice : « Action d'Intervention sur Programme ». En choisissant un tel statut pour cette collaboration, la direction de l'INRA semble plus ou moins adroitement signaler qu'il y a une certaine urgence (« intervention ») à rattraper un retard. Il est révélateur que, dans le cadre d'une deuxième AIP (ouverte de 1996 à 1998) entre l'unité CIRAD/INRA et l'unité PIAF de bioclimatologie (PIAF = Physiologie Intégrée de l'Arbre Fruitier) de Clermont-Ferrand, ce même acronyme finisse par recouvrir les mots : « Action Incitative Programmée »[4] où la directivité n'est plus du tout allusive. On comprend que cela ait pu choquer certains des membres participants. D'autre part, sur le fond, l'enjeu de cette AIP paraît délicat. Comme nous l'avons vu, il est en effet admis par le comité de pilotage que les chercheurs auront à se plier aux méthodes d'approche de leurs collègues du CIRAD. Ce n'est donc pas vraiment d'une collaboration qu'il s'agit mais plutôt d'une instruction de certains chercheurs par d'autres. Les susceptibilités ne sont pas ménagées en cette occasion. Le comité de pilotage se voit donc obligé, et c'est assez rare pour qu'on le note, de défendre sa position avec un argumentaire fourni et rigoureux. Les amertumes sont telles que les éditions de l'INRA ont publié le détail de ces mises au point, au début des actes du Colloque de synthèse des 23-25 novembre 1993. Ces actes sont ainsi pourvus de deux introductions : un argumentaire en règle qui pose et résout le problème de façon diplomatique, un historique qui s'attache à montrer qu'il n'y pas d'alternative pour les dendrométriciens. Ces textes sont à l'initiative de deux chercheurs qui n'appartiennent pas au CIRAD : Jean Bouchon, qui est alors directeur de recherche à l'INRA de Nancy, membre du comité de pilotage de l'AIP et François Houllier, responsable de l'Equipe de

[1] [Bouchon, J., 1995], p. 7.
[2] Voir la postface de Jean Bouchon et Françoise Dosba [Bouchon, J., 1995], p. 349.
[3] [Bouchon, J., 1995], p. 349.
[4] Dans la page internet « les architectes du végétal » de l'INRA : [INRA, architecte, 1998], p.1.

Dynamique des Systèmes Forestiers de l'ENGREF (Nancy), associée à l'INRA. Ces deux dendrométriciens d'origine s'attachent à montrer à leurs collègues le bien-fondé d'une démarche où il semble qu'on leur force la main.

Il faut noter que c'est à cette occasion que les scientifiques qui sont responsables de la politique de recherche se sentent obligés de recourir à l'histoire de leur domaine. Pourquoi l'histoire des sciences fait-elle irruption dans le travail scientifique lui-même ? Il apparaît bien, selon Bouchon et Houllier, que l'écriture de l'histoire des sciences par les scientifiques eux-mêmes aurait une vertu scientifique : celle de relativiser la valeur des modèles du moment, modèles auxquels on risque toujours trop de s'attacher pour des raisons autres que purement scientifiques[1]. Elle aurait aussi la vertu de donner des perspectives plus amples, des vues d'ensemble plus objectives sur l'accroissement des connaissances du domaine considéré. Elle aurait enfin la vertu de démontrer, au vu du chemin quasiment logique déjà parcouru, que l'étape supplémentaire proposée constituerait l'avancée la plus « rationnelle ». C'est essentiellement le cas ici. Il nous faut donc bien rester prudent sur la valeur de cette écriture de l'histoire des sciences : elle reste orientée vers un objectif précis, dans le cadre d'une rationalisation *a posteriori*.

Les hésitations de l'INRA : les arguments en présence

Jean Bouchon ne cache pas que la Direction des Recherches Forestières de l'INRA a elle-même longtemps hésité à collaborer avec l'AMAP. De leur côté, en effet, les dendrométriciens faisaient valoir une autre conception du modèle que celle de l'AMAP. Le débat était d'autant plus amer qu'il portait sur la nature même de l'activité scientifique dans le domaine du végétal : qu'est-ce que modéliser le végétal ?

Pour beaucoup des chercheurs de l'INRA, il n'était pas indispensable « d'utiliser des moyens aussi complexes pour résoudre les problèmes qui se posaient »[2]. Il suffisait selon eux de poursuivre la modélisation locale sans chercher à ajouter la complexité d'un point de vue global là où justement il s'agit de clarifier les phénomènes. On retrouve là encore une opinion proche de celle que partage Legay et que partageaient avec lui la plupart des biométriciens dans les années 1970 : le modèle est un outil de découverte et de compréhension. Il est finalisé par nature et son usage ne peut être universel. Il ne peut rendre compte que d'un ou deux aspects de la réalité en même temps, pas plus. Il est fondé sur l'interaction entre divers éléments qui ont, pris individuellement, un sens biologique bien défini. Bouchon stigmatise cette position en la rattachant à ce qu'il appelle « l'école française de modélisation »[3]. Il oppose ainsi les « modèles optimaux » aux « modèles maximaux ». Les modèles optimaux sont minimaux dans la mesure où l'on n'y retient que le strict nécessaire pour rendre compte d'une évolution particulière de la plante. Ce sont les seuls valides pour l'école française de la modélisation. Alors que les tenants des « modèles maximaux » sont supposés faire valoir l'adage selon lequel « qui peut le plus peut le moins ». Selon ces derniers, on pourra résoudre des problèmes régionaux par « réductions ou dégradations successives » du modèle maximal. Or la simulation est l'exemple type du « modèle maximal ». Le malentendu repose donc ici sur la question de savoir ce que doit embrasser un modèle pour être valide. Quel objet doit-être modélisé ? L'architecture est-elle un bon objet de modélisation ? Quel point de vue le modélisateur doit-il adopter : réductionniste ou holiste ? Son

[1] Une façon pour le scientifique de faire son deuil d'une pratique jusque là quotidienne…
[2] [Bouchon, J., 1995], p. 9.
[3] [Bouchon, J., 1995], p. 11.

présupposé doit-il être que les parties expliquent le tout ou qu'il y a plus dans le tout que dans la somme des parties ?

Ce vieux débat, récurrent dans les phases de transition, pose entre autres la question de savoir si l'on doit accepter une certaine opacité, des zones d'obscurité dans les modèles ou pas, et si l'on peut mettre en équation des relations que l'on ne comprend pas c'est-à-dire que l'imagination ne peut se représenter. Peut-on au fond modéliser une relation dont on ne pourrait faire le schéma avec du papier et un crayon ? Le modèle doit-il toujours se ramener à une visualisation schématique[1] des processus en jeu ? Ou doit-on se résoudre à ce qu'un modèle du vivant puisse n'être qu'un ensemble d'expressions mathématiques renvoyant éventuellement à des fictions et non à des entités ayant un sens biologique ? Pour les membres du comité de pilotage, il ne faut pas craindre le caractère désormais très formel des modèles de simulation. Il ne faut pas opposer stérilement ces différents types de modèles les uns aux autres, mais les faire se rencontrer, les faire converger sur un terrain formel commun. Cependant peut-on faire se rencontrer des modèles qui n'ont pas le même statut intellectuel ? De plus, il ne s'agirait pas vraiment d'une rencontre puisqu'en fait la simulation aura une position de surplomb dès le départ, étant donné sa différence de nature. C'est ce que certains dendrométriciens de l'INRA craignent lorsqu'ils se demandent ce qu'est réellement capable d'expliquer la simulation pour qu'on la laisse tenir une telle position de surplomb dans le petit monde des modèles. Selon eux, si un modèle tient une position privilégiée par rapport aux autres, c'est nécessairement parce qu'il explique mieux que les autres. Est-ce la cas de la simulation ?

La deuxième critique essentielle, liée à la première, a donc porté sur le caractère uniquement descriptif et non fonctionnel du modèle de l'AMAP. Si par exemple on demande pourquoi les arbres fourchent, ce modèle ne nous fournirait aucune explication, même s'il peut simuler un arbre qui fourche. Bouchon répond que lorsqu'on saura pourquoi ils fourchent, on pourra intégrer sans mal cette connaissance des mécanismes fins dans l'ossature du programme de l'AMAP. La réponse consiste donc à faire comprendre aux chercheurs cette propriété qu'aurait la simulation architecturale de supporter tout sous-modèle fonctionnel qui se présenterait. Tout en étant un intégrateur de modèles, la simulation architecturale n'impose pas une explication unifiant et simplifiant la diversité des phénomènes : elle n'est pas à strictement parler un méta-modèle. Elle colporte très peu d'hypothèses physiologiques puisqu'elle repose sur des bases descriptives systématisées à un tout autre niveau que celui de la cellule ou de la physiologie. Cette objection et la réponse qu'elle reçoit montrent la difficulté que les chercheurs ont eue pour admettre la nouvelle fonction de la simulation dans le champ de la modélisation. La simulation est certes un modèle mais ce dernier est conçu d'abord hors de toute visée explicative. Bouchon tente de leur expliquer que si la simulation était un modèle au sens où ils l'entendent, ils auraient raison de se croire doublés par leurs collègues du CIRAD. Or tel n'est pas le cas : ce n'est donc pas leurs modèles qui sont en cause, mais plus profondément, la définition qu'ils donnent de la notion de modèle. Le « modèle » de l'AMAP fait partie des « modèles descriptifs compliqués » ; ils s'opposent aux « modèles fonctionnels [ou explicatifs] simples »[2]. Telle est la source du malentendu.

Une troisième critique transparaît dans les communications entre chercheurs pendant les trois années de cette AIP. Les modélisateurs de l'INRA se demandent quel usage on pourra faire d'une simulation incapable de « prédire l'avenir d'un arbre qui aura subi une taille de formation, ou

[1] À ce sujet, voir les classifications éclairantes de Sylvanie Guinand dans son article « Le modèle en biologie » de l'*Encyclopaedia Universalis*. Elle y oppose le modèle concret, visualisable, au modèle abstrait. Le modèle par schéma fait partie, selon elle, des modèles concrets.
[2] [Bouchon, J., 1995], p. 11.

l'avenir d'un peuplement qui aura été éclairci »[1]. Ce problème vient de l'approche stochastique : le réalisme de cette approche, au sens botanique, se paie par la nature seulement probabiliste de ses prédictions. L'avenir d'un individu ne peut être prédit avec certitude. Fondée sur des mesures statistiques, la simulation ne peut proposer que des descriptions de comportements probables. Les dendrométriciens de l'INRA veulent bien admettre un certain flou dans la connaissance des phénomènes physiologiques. Mais c'est afin qu'une prédiction soit possible. Si l'on ne peut pas expliquer, que l'on puisse au moins prédire ! Le modèle de l'AMAP semble ne permettre ni l'un ni l'autre.

Cette critique est forte. Elle oblige Jean Bouchon à revenir au statut essentiellement empirique de la simulation. En fait, répond-il, la simulation sert à « économiser de l'expérimentation de terrain »[2]. Il faut comprendre par là qu'elle permet de disposer, pour la première fois en foresterie, d'organismes modèles. Ses organismes simulés peuvent jouer le même rôle que les organismes modèles du type de la bactérie *E. Coli* en biologie moléculaire, ou de la drosophile en génétique. En effet, leur vitesse de croissance peut être décuplée et des « expérimentations » sont donc envisageables. La simulation permet de s'affranchir des contraintes techniques inhérentes à la mise en forme des êtres vivants complexes dans la réalité : la longue durée, le passage du temps[3].

Pour Bouchon, la simulation est un modèle en un sens nouveau. Elle l'est au sens où elle semble prendre place parmi les individus représentatifs d'une espèce vivante qui ont été choisis parce qu'ils sont plus faciles à étudier que les autres. Ces organismes sont habituellement appelés « modèles » parce qu'ils sont supposés être sujets aux mêmes phénomènes de croissance que les autres et qu'ils ont, en plus, la qualité de rendre ces phénomènes plus « lisibles », plus accessibles à l'observation et à la mesure. La simulation, dans cet usage scientifique précis remplace un « organisme modèle » réel. C'est pourquoi elle est plus encore qu'une « maquette architecturale »[4] où l'on ferait simplement communiquer des modèles explicatifs régionaux. Elle devient une doublure de la réalité, un objet d'étude en lui-même, un objet de curiosité déplacé dans l'ordinateur, un transfert des phénomènes du vivant encore inconnus dans la machine. C'est en quoi elle peut donner lieu à des « expérimentations » au même titre que la plante réelle. Elle tend à se confondre[5] avec le domaine d'investigation lui-même. La simulation n'est pas seulement

---

[1] [Bouchon, J., 1995], p. 14.
[2] [Bouchon, J., 1995], p. 14.
[3] En son temps, le philosophe Bergson attribuait la résistance de certains phénomènes matériels à l'explication scientifique au fait qu'ils ne se mesuraient qu'à l'aune de notre propre durée, de notre vécu de conscience : « si je veux me préparer un verre d'eau sucrée, j'ai beau faire, je dois attendre que le sucre fonde », [Bergson, H., 1941], p. 9. Car ce temps d'attente n'était pas pour lui un temps mathématique, extensible ou rétractable à volonté ainsi qu'une portion d'espace peut l'être ; il était un temps vécu et il coïncidait avec notre propre durée qui, elle, ne lui semblait susceptible d'aucune contraction ou dilatation. Aurait-il réévalué son jugement face à la simulation ? Cette technique semble en effet permettre à la science de contourner ce problème de la « mise en lois » des systèmes dynamiques complexes en cherchant des modèles pourvus de règles. À ce sujet, voir également [Prigogine, I. et Stengers, I., 1979], *passim* et [Prigogine, I. et Stengers, I., 1992], pp. 19-22.
[4] [Bouchon, J., 1995], p. 23.
[5] Confusion qui, encore en 1997, est inacceptable pour Jean-Marie Legay. Voir [Legay, J.-M., 1997], p. 55: « dans tous les cas, le modèle ne permet pas d'éviter l'expérience. Bien au contraire, il suggère et organise des expériences ; il peut en économiser quelques unes, mais aussi en proposer d'autres. Bien entendu, même *la simulation ne remplace pas l'expérience, elle n'en est pas une*, elle permet de détecter des absurdités, de désigner des faisabilités. Ce n'est pas parce qu'un calcul est possible, qu'il est pertinent. Seule l'expérience rendra un verdict significatif. » C'est nous qui soulignons.

un terrain formel partageable et où l'on parle un langage commun[1]. C'est un nouveau terrain pour de nouvelles expérimentations.

Mais, même si on les sent présentes, ces idées ne sont pas exposées dans toutes leurs implications par Bouchon. Au contraire, il concède sur la fin que c'est la comparaison avec les résultats de terrain qui permettra, en dernière analyse, de « tester la qualité des prédictions », autrement dit de valider la simulation. Comme un modèle, la simulation se valide donc. La simulation complexe qui réplique le réel n'a pas pour objet de le représenter de manière compréhensible ni directement opérationnelle, mais elle nécessite quand même aussi une calibration préalable pour être substituée à lui et servir ensuite seulement à une enquête, qu'elle soit de compréhension ou d'utilisation/prédiction. Cela semble manifester un net retour en arrière : à la lire rapidement, cette concession semble redonner à la simulation le caractère exclusif de modèle explicatif à tester, caractère éminemment discutable comme on l'a vu. Cet apparent repli sur des positions antérieures ou plutôt sur ce qu'il y a de commun entre simulation informatique et modèle mathématique permet en tout cas à l'auteur de se faire entendre des chercheurs de l'INRA et de ne pas les effrayer en s'étendant sur les expériences par ordinateur, véritable hérésie pour beaucoup d'entre eux. Il s'agit de les rassurer en reconnaissant que cette nouvelle forme de modélisation sera elle aussi, à terme, l'objet de tests sur le terrain, au sens de véritables comparaisons avec la réalité végétale, sans entrer dans une véritable discussion sur la nature ni sur le sens épistémique de ce test[2].

Cela n'empêche pas Bouchon de conclure très fermement : « il semble que nombre de problèmes anciens ou nouveaux qui se posent en recherches forestières ne puissent plus être résolus que par une approche architecturale. »[3] Cette tension entre des points de vue divergents va d'ailleurs jusqu'à transparaître dans les articles techniques eux-mêmes. Dans quelle mesure les chercheurs de l'INRA ont-ils, sur le terrain, appliqué ces nouvelles directives, lors de l'AIP ? Ont-ils tous été conciliants ? Quel est, au fond, ce qui les sépare des recherches de l'AMAP ?

Des traces de réticences dans les actes du Colloque de synthèse

Il est important de noter que les actes de ce colloque ont été publiés en deux volumes séparés. D'un côté, dans [Bouchon, J., 1997], on trouve une présentation systématique de la méthode éprouvée de l'AMAP avec ses résultats, écrite exclusivement par le CIRAD. De l'autre, dans [Bouchon, J., 1995], on trouve les articles produits essentiellement par les chercheurs des laboratoires de l'INRA. C'est un indice qui tend à nous montrer que le rapprochement escompté n'a pas véritablement eu lieu. Cette impression se confirme si nous concentrons notre attention sur le contenu du second volume. Au vu des articles techniques présents, on peut y déceler trois catégories.

La première catégorie est celle des articles résultant de la collaboration effective de chercheurs du CIRAD et de l'INRA : ils sont au nombre de six sur un total de vingt-deux. Tous ces articles renvoient de façon plus ou moins naturelle à la méthode d'AMAP, soit en appliquant au niveau conceptuel l'analyse architecturale mise au point au CIRAD à l'étude d'une espèce particulière, soit en appliquant la simulation elle-même à l'espèce considérée. Il comporte en

[1] En ce sens, la simulation informatique de la plante n'est pas seulement une « *trading-zone* », une zone frontalière et de commerce où l'on parle un créole juste bon pour des échanges, comme Peter Galison le suggère en revanche pour le cas de la simulation numérique en physique nucléaire. Voir [Galison, P., 1997], pp. 803 et 833-837.

[2] Dans le cas de la simulation, c'est en effet le « test » ou la validation du modèle qui change également de sens et appelle la mise en œuvre d'autres techniques.

[3] [Bouchon, J ., 1995], p. 13.

général une phrase de remerciement à l'égard d'un ou de plusieurs des membres de l'AMAP pour leur soutien dans la mise en œuvre de la méthode[1]. Ces articles sont donc essentiellement les résultats soit d'un accueil physique de chercheurs de l'INRA au laboratoire du CIRAD, soit d'une mission de conseil effectuée par un des chercheurs du CIRAD dépêché sur place.

Dans la deuxième catégorie d'articles, se manifeste le fait que les chercheurs se sont assez peu souciés de l'approche AMAP. Ils ont appliqué leur méthodologie habituelle sans essayer de se plier aux directives du comité de pilotage de l'AIP. Ainsi, les chercheurs de l'INRA d'Avignon n'ont eu recours qu'aux analyses architecturales de Champagnat. Ils ont utilisé ainsi les distinctions conceptuelles que cet auteur mettait en œuvre entre 1947 et 1965 alors même que les interventions de l'AMAP au cours du colloque rappellent que ces distinctions étaient des ébauches et qu'il faut les rénover en s'appuyant sur les travaux, qu'ils jugent fondamentaux, de Hallé, et sur les leurs. Un chapitre conséquent des actes du colloque[2], écrit par deux chercheurs du CIRAD, revient en détail sur l'histoire des termes techniques concernant la mise en place de l'architecture végétale et tâche de montrer qu'il faut se diriger vers un accord sur la terminologie. Certains chercheurs de l'INRA en resteraient-ils donc à une vision « dépassée » de l'architecture végétale ?

Un indice peut nous mettre sur la voie. En effet, la troisième catégorie d'articles semble précisément s'engouffrer dans cette brèche. Elle se sert délibérément de la confusion des termes. C'est celle qui rassemble les chercheurs les plus réfractaires aux idées de leurs collègues du comité de pilotage. À mots plus ou moins couverts, ils n'admettent pas la méthode de l'AMAP. Et l'on perçoit qu'ils font reposer leur refus sur des divergences dans la signification des termes techniques. Des termes aussi généraux que celui d'« architecture » prennent chez eux un tout autre sens. Ce dernier mot ne renvoie pas pour eux aux recherches fondamentales de Hallé et Oldeman. Dans un article écrit par deux chercheurs de l'INRA d'Avignon et de l'ENITEF (Ecole Nationale des Ingénieurs et Techniciens des Eaux et Forêts), on lit par exemple : « l'architecture étudiée est non seulement celle du houppier, mais aussi celle de la structure interne de la tige (empilement des cernes, épaisseur de l'écorce, largeur du duramen…). »[3] Ils mêlent ce que l'école de Hallé avait classé et distingué. C'est là renoncer à penser les plantes dans les mêmes termes que les architectes du végétal. On comprend alors qu'ils ne voient pas l'intérêt d'une modélisation de la partie aérienne de l'arbre. Ils s'expriment et pensent en termes de « gestion », de « facteurs de production du bois », d'« optimisation »: ils ont donc clairement une perspective sylvicole sur la question. Ils apparentent une plantation d'arbres à une usine plus qu'à un ensemble d'entités formelles générant des formes par algorithmes, comme c'est le cas pour l'AMAP. Cette vieille métaphore sous-jacente de l'usine productrice d'énergie, ou de matière première (le bois), ne peut pas être en accord avec la perspective de la simulation architecturale, où la métaphore est algorithmique. Il est ainsi révélateur qu'ils ne se servent des données du CIRAD qu'au titre de « mesures » visant à compléter les leurs. L'architecture du houppier n'est plus qu'un compartiment parmi d'autres de la plante :

« Il était intéressant, dans le cadre de cette AIP, de profiter des mesures de description fine de la branchaison réalisées par le CIRAD pour les mettre en relation avec les accroissements radiaux. » [4]

---

[1] Voir par exemple [Bouchon, J., 1995], pp. 137, 189, 233, 272.
[2] [Bouchon, J., 1997], pp. 11-87.
[3] [Bouchon, J., 1995], p. 192.
[4] [Bouchon, J., 1995], p. 204.

C'est la seule occasion pour eux d'évoquer le travail du CIRAD et de s'y associer en un sens qui n'a plus rien de commun avec la politique scientifique de l'AIP. Leur désaccord sur le fond s'exprime dans la conclusion de leur article :

« La description détaillée de la ramification n'est pas une fin en soi mais bien un moyen d'obtenir une architecture en trois dimensions, support nécessaire pour l'application de connaissances physiologiques sur le fonctionnement du houppier. »[1]

C'est le fonctionnement du houppier seul qui est censé ici être l'objectif de la simulation architecturale. Autrement dit, selon eux, les recherches en architecture n'ont pas plus d'intérêt que les autres approches. Les seuls modèles qui valent sont ceux qui expliquent d'emblée la physiologie des phénomènes. Si l'architecture a un rôle qu'on peut lui concéder, c'est effectivement de servir de « support » pour les véritables modèles. Mais ces modèles ne concerneront alors que le houppier et pas l'arbre dans sa totalité. Suit, dans le texte, une réhabilitation en règle de l'approche physiologique globale et donc une critique des modèles physiologiques locaux. Si ces derniers sont locaux, c'est parce qu'on l'a bien voulu. Il ne tiendrait qu'à nous d'infléchir cette fâcheuse tendance. On s'est ainsi éloigné du « résultat et des conséquences de cette croissance »[2]. Et la conclusion est :

« Pour que cette démarche soit pertinente, il est essentiel que se développe parallèlement aux mesures descriptives et aux modèles empiriques, l'acquisition des connaissances qui touchent aux véritables fonctions écophysiologiques de l'arbre. Les hypothèses sont fortes et le besoin de validation de ces modèles est bien sûr d'autant plus important. » [3]

Ce mot d'ordre semble bien à l'exact opposé des directives de l'AIP comme des conceptions de la direction de l'INRA. En analysant les opinions et les manières de procéder, nous avons compris que l'approche de l'AMAP ne fait pas l'unanimité parmi les chercheurs. Les divergences de vue tiennent pour l'essentiel à la nature même du modèle mais aussi à la façon de percevoir, décrire et classer les formes du vivant : en gros, on adopte l'approche par l'architecture si on se réclame des travaux de Hallé et Oldeman. Mais, si on décide qu'il n'y a là qu'une approche descriptive et donc relativement stérile car ne permettant pas de comprendre, on en reste à la recherche prioritaire de modèles physiologiques.

Le bilan de l'AIP se trouve donc au final assez mitigé : les chercheurs du CIRAD (de Reffye, Costes et Barthélémy) ont énormément travaillé pendant deux ans pour disposer de données traitables en vue de problématiques propres à l'INRA. Mais les chercheurs de l'INRA, quant à eux, n'ont pas toujours joué le jeu. La seconde décision forte de Coléno intervient alors à ce moment-là : pour éviter que les chercheurs de l'INRA continuent à négliger massivement la simulation architecturale et ne finissent par réinventer plus tard ce qui existe d'ores et déjà au CIRAD, il lui paraît nécessaire de pérenniser le lien AMAP/INRA en le rendant organique. Une solution aurait été de recruter directement Philippe de Reffye. Mais Coléno s'y refuse : l'INRA n'avait pas su voir, à ses débuts, le potentiel qu'il recelait ; il aurait été injuste de le dérober sur le tard au CIRAD au moment où les résultats arrivaient. La solution d'un rapprochement institutionnel est donc choisie.

---

[1] [Bouchon, J., 1995], p. 206. C'est nous qui soulignons.
[2] [Bouchon, J., 1995], p. 206.
[3] [Bouchon, J., 1995], p. 206.

Le rapprochement institutionnel INRA/CIRAD autour d'AMAP (1993-1995)

À terme donc, la politique du comité de pilotage favorisant les recherches en architecture a en quelque sorte gain de cause. Cette AIP est décisive puisque c'est bien elle qui préfigure le rapprochement institutionnel entre le laboratoire de modélisation des plantes du CIRAD et l'INRA. Cela conduit en retour l'AMAP à réorganiser et réorienter ses recherches. Le rôle de François Houllier devient ici central. C'est lui qui va concrétiser tant les liens scientifiques entre la simulation architecturale et les problématiques de modélisation forestières que les liens institutionnels entre l'AMAP et l'INRA. Mais quel a d'abord été son parcours ? Comment en est-il venu à croiser le chemin de l'AMAP ?

En 1986, sous la direction d'Alain Pavé[1], professeur à Lyon 1 et ancien élève de Legay, François Houllier avait soutenu sa thèse sur « la modélisation de la dynamique des peuplements forestiers ». Dans une approche d'abord essentiellement biométrique, Houllier avait tâché d'établir des liens entre les modèles de croissance des arbres et les modèles de peuplement par échantillonnages[2]. Sur les conseils de Jean-Pierre Troy, alors directeur scientifique de l'ENGREF, il avait rencontré ponctuellement Philippe de Reffye et Evelyne Costes lors d'un passage dans le nouveau centre de l'ENGREF tout récemment implanté à Montpellier. Il se trouve en effet que le laboratoire de modélisation des plantes était à l'époque logé dans des murs qui avaient été acquis par l'ENGREF, avant qu'il soit réintégré un peu plus tard dans des locaux du CIRAD. Comme Francis Hallé, Jean-Pierre Troy était spécialiste des forêts tropicales. Il connaissait donc Hallé personnellement et il l'avait invité à faire des enseignements au centre ENGREF de Montpellier où se trouve une formation spécifiquement tropicaliste. Hallé professait alors à l'Université de Montpellier 2.

Troy a donc connaissance du travail de de Reffye par ce biais. Il conseille à Houllier d'aller voir comment on modélise les plantes chez ces élèves de Hallé. Or, même si Houllier est impressionné par les images de l'équipe de de Reffye, il ne citera qu'incidemment ce travail dans sa thèse de 1986 : l'approche des gens du CIRAD lui paraît assez opaque de par la certaine technicité botanique qu'elle exige. En tout cas, le premier contact lui paraît peu décisif pour sa problématique de thèse.

Par la suite, ayant appliqué son propre travail aux données de l'Inventaire Forestier National (IFN) sur le site de Montpellier, il y reste pendant deux ans comme ingénieur de recherche. En 1988, Jean-Pierre Troy étant devenu entre-temps président de l'ENGREF, Houllier y devient professeur. De fait, ce dernier souhaite à l'époque réintégrer la recherche plus conceptuelle et il est, pour cela, également rattaché au Centre de Recherche Forestières de l'INRA de Nancy. En

---

[1] Alain Pavé avait fait ses études d'ingénieur à l'INSA de Lyon, au début des années 1960. En 1966, il intégra le Laboratoire de Biométrie de la Faculté des Sciences de Lyon, dirigé à l'époque par Jean-Marie Legay. En 1980, il soutint sa thèse d'Etat sur la théorie et la pratique de la modélisation en biologie cellulaire et moléculaire. Par la suite, il développa son intérêt pour des modélisations mathématiques de toute nature et intéressant des phénomènes biologiques à toutes échelles, mais en favorisant souvent une approche populationnelle inspirée des modèles de la dynamique des populations. Voir [Pavé, A., 1995]. Suivant la voie ouverte par Legay, il devint ensuite Professeur à l'Université de Lyon 1 et directeur de l'Unité de Recherche Associée URA 243 (baptisée plus tard Unité Mixte de Recherche - UMR 5558). Dans son travail, il s'était lui aussi très tôt intéressé à l'usage que l'on pouvait faire de l'informatique mais dans une approche d'abord essentiellement cognitiviste (de type système expert, puis intelligence artificielle), comme Coléno, bien qu'il se soit également, mais ponctuellement, intéressé aux L-systèmes et aux différents modèles de morphogenèse. Pour son auto-biographie intellectuelle, voir *ibid.*, pp. 5-24.

[2] [Houllier, F., 1986], pp. 2-3. Il fait une revue des modèles existants. Il montre la limite des modèles globaux dépourvus de détails et il propose un « modèle probabiliste structurel » pour faire le lien entre le niveau de l'arbre et celui du peuplement. Mais il n'intègre pas la morphologie et se cantonne à un espace plan, c'est-à-dire à une situation non tridimensionnelle (*ibid.*, p. 136). Pour cette thèse, Houllier a bénéficié d'un co-directeur en la personne de Jean Bouchon.

tant qu'enseignant-chercheur, il est intégré dans la nouvelle équipe « Dynamique de Systèmes Forestiers », auprès de Jean Bouchon.

C'est en fait dans ce contexte qu'Houllier est véritablement sensibilisé à l'importance des modèles morphologiques fins, notamment pour la prédiction et le contrôle de la qualité du bois. Dans un premier temps, il travaille en effet aux côtés du chargé de recherche Jean-Michel Leban. Dans le cadre de l'Equipe de Recherche sur la Qualité des Bois, Leban avait conçu un logiciel - SIMQUA - capable de simuler la qualité du bois scié à partir de descriptions morphologiques des grumes[1]. Ce logiciel permettait déjà de visualiser des planches virtuelles en fonction de la répartition des contraintes mécaniques internes. Entre 1988 et 1990, avec lui et le doctorant Francis Colin[2], Houllier va étendre cette perspective. Il va également concevoir un petit logiciel pour la modélisation de la Croissance de l'Epicéa (baptisé CEP). En 1988, sous l'impulsion de Rémi Pochat, le directeur de la recherche de l'ENGREF qui avait entre-temps remplacé Troy, Houllier participe à une deuxième réunion avec les chercheurs de l'AMAP : De Reffye, Jaeger et Blaise. Ce deuxième contact se passe mieux. Houllier est notamment frappé qu'un botaniste spécialiste de l'hévéa reconnaisse un clone rien que par sa représentation visuelle sur l'écran[3] : cela semble confirmer l'idée de de Reffye selon laquelle il n'y a pas de meilleure validation que celle de l'œil de l'expert.

Toujours est-il que la technique adoptée et développée par l'AMAP reste encore grandement opaque même à ses proches voisins, dont Houllier. La raison tient en partie au fait que les publications de de Reffye sont encore très confidentielles : les articles fondateurs de *Café, Cacao, Thé* publiés de 1981 à 1984 sont difficilement accessibles. Ils ne figurent pas toujours dans les bibliothèques de recherches forestières. Et de Reffye, lui-même, n'est pas toujours prêt à les communiquer rapidement. De fait, il faut attendre sa publication dans *La Recherche* de 1989 pour que les principes de la simulation architecturale soient diffusés dans les grandes lignes et mieux compris par les chercheurs de l'INRA eux-mêmes.

En 1991, en pleine AIP, Houllier, Bouchon et Birot publient néanmoins un article fondateur dans la *Revue Forestière Française* : « Modélisation de la dynamique des peuplements forestiers : état et perspective »[4]. Tout en présentant succinctement les avantages et les limites des modèles à différentes échelles, ils font discrètement valoir l'idée que l'avenir de la modélisation forestière passe par les modèles d'arbres où davantage de connaissances biologiques et botaniques devront être intégrées[5]. Ils présentent l'avènement des modèles architecturaux comme annonciateur d'un « saut qualitatif »[6]. Et ils espèrent que cette approche sera bientôt à même de prendre en compte la concurrence entre arbres voisins comme tend à le faire déjà la thèse de Blaise. Par la suite, cet article sera le point de départ de nombreux travaux de doctorants.

Lors de l'AIP, l'équipe de François Houllier est bien sûr retenue par l'appel d'offre. Jean Bouchon y veille de toute façon. Pendant deux ans, Houllier collabore donc étroitement avec de Reffye, Frédéric Blaise et Thierry Fourcaud[7]. À cause de la distance, leurs relations sont surtout

---

[1] Voir [RFF, 1995, vol. 47], pp. 131-140.
[2] En 1992, Francis Colin soutiendra une thèse à l'ENGREF sur « Analyse et modélisation de la branchaison de l'Epicéa commun en vue de prédire la qualité de la ressource », [Bouchon, J., 1997], p. 419.
[3] [Houllier, F. et Varenne, F., 2000], p. 7.
[4] [Houllier, F., Bouchon, J. et Birot, Y., 1991].
[5] [Houllier, F., Bouchon, J. et Birot, Y., 1991], pp. 98-99.
[6] [Houllier, F., Bouchon, J. et Birot, Y., 1991], p. 98.
[7] Thierry Fourcaud est un ingénieur mécanicien de formation. En 1996, il soutiendra une thèse sur la biomécanique des plantes. Il y intègre la méthode des éléments finis dans les maquettes informatiques d'AMAP de manière à prédire le comportement mécanique de l'arbre. À cette époque, aux côtés de Houllier, il contribue à affiner les problèmes d'intégration de l'écophysiologie dans les simulations d'AMAP. Il est par la suite recruté comme chercheur-enseignant

épistolaires, de Reffye préférant ce mode de correspondance au courrier électronique. Pour Houllier, sur le fond, il s'agit d'intégrer quelques unes des idées de SimCop (Ottorini) et de CEP (Leban – Houllier) dans AMAPpara. Sur cette plate-forme d'AMAP, dont on se souvient qu'elle calcule maintenant les méristèmes en parallèle, les trois chercheurs intègrent la prise en compte de l'allocation de matière dans le tronc à chaque étape de croissance, cela en utilisant certaines lois simplifiées, comme la loi de Pressler[1]. Il s'agit donc d'établir pour la première fois des relations fines et calculables entre l'architecture précise du houppier en concurrence, et la structure de la tige, c'est-à-dire la distribution des cernes dans le tronc[2]. En fait, les auteurs sont obligés de se livrer à de nombreuses simplifications pour évaluer de manière calculable la surface foliaire et, par suite, l'allocation de la matière[3]. Et le résultat est mitigé : malgré la prise en compte de l'architecture, certaines hypothèses de simplification sont encore trop lourdes. Il s'avère notamment qu'il aurait fallu prendre en compte le système racinaire dans le modèle d'allocation de matière[4].

En juillet 1994, Houllier quitte son poste d'enseignant-chercheur à l'INRA et à l'ENGREF et, sur une instigation de Jean-Pierre Pascal[5], il part diriger l'Institut Français de Pondichéry. Il continue donc, à distance, sa collaboration avec de Reffye. Il travaille à relier l'architecture à la croissance du tronc, c'est-à-dire la structure de la plante avec son fonctionnement. Assez paradoxalement, c'est en Inde que Houllier poursuit plus que jamais ses recherches conceptuelles en modélisation. La remarquable organisation administrative de l'Institut et le relatif isolement dont il jouit l'y autorisent en fait. Ayant passé une thèse d'habilitation en 1992, c'est même d'Inde qu'il dirigera un certain nombre de ses premiers doctorants.

Entre-temps, fin 1993, toujours sous l'impulsion de Coléno, Daniel Barthélémy et Evelyne Costes sont recrutés comme chercheur à l'INRA. Mais ils restent tous les deux en poste à AMAP. Dans la foulée de l'AIP initiée par Coléno, AMAP poursuit seul sa convergence vers des questions d'allocation de matière dans la structure. À partir de 1994, le laboratoire infléchit donc nettement son travail vers le fonctionnement des plantes[6].

Formalisation conceptuelle et institutionnelle : le laboratoire associé CIRAD/INRA (1995)

En parallèle, suite à la thèse de Blaise et face aux effets en retour de la simulation sur les concepts botaniques, un besoin de clarification et de systématisation conceptuelle se fait sentir. De Reffye constate qu'à chaque fois que l'on change de plantes, il est en fait nécessaire de se livrer à des modifications *ad hoc* pour faire correspondre le modèle informatique intégré et ses processus stochastiques au nouvel objet d'étude. Le modèle informatique manque donc de généralité. De plus, l'AMAP souffre d'une absence de compatibilité interne entre ses propres logiciels. Afin de

---

auprès de l'Université de Bordeaux I et du Laboratoire de Rhéologie du Bois. Il appartiendra alors à une Unité Mixte CNRS/INRA/Université de Bordeaux I. Et il restera également membre du programme de modélisation des plantes.

[1] Loi phénoménologique approximative remontant au forestier allemand R. Pressler (1865). Elle « établit les modalités de la croissance en diamètre du tronc en fonction des caractéristiques du houppier ». Elle postule que « la surface du cerne périphérique annuel du tronc croit linéairement à partir du sommet de l'arbre jusqu'à la base du houppier, puis reste constante en dessous, jusqu'au sol », [Bouchon, J., 1997], p. 266.

[2] [Bouchon, J., 1997], p. 260.

[3] « La prise en compte des interactions entre arbres entraîne une explosion combinatoire du temps de calcul et de l'espace mémoire requis », [Bouchon, J., 1997], p. 384. Par exemple, sur une Station Silicon Graphics R4000 disposant de 80 Mo de mémoire vive, et pour un épicéa de 15 ans, le calcul met 4'51'' à s'effectuer pour les 4 premiers ordres d'axe.

[4] [Bouchon, J., 1997], p. 415.

[5] Forestier, spécialiste de l'écologie et de la dynamique des forêts tropicales et directeur de recherche au CNRS, UMR EcoFog.

[6] [Houllier, F. et Varenne, F., 2000], p. 20.

régler ces problèmes, le CIRAD recrute deux mathématiciens-informaticiens au titre d'ingénieurs chercheurs : Yann Guédon et Christophe Godin. Ils sont tous les deux jeunes diplômés et docteur de l'Université de Technologie de Compiègne (UTC)[1]. Ils développent d'abord le logiciel AMAPmod (mod pour modélisation) et le langage AML (pour *AMAP Modeling Language*). AMAPmod sert à estimer systématiquement les paramètres des processus stochastiques qui interviendront dans une simulation gérée par le logiciel de Jaeger, baptisé entre-temps AMAPsim (pour simulation) depuis qu'il a été réécrit par l'ingénieur-chercheur Jean-François Barczi[2] en intégrant les notions d'âge physiologique et de processus markoviens. AMAPmod utilise le langage de description standardisé AML, lui-même construit sur la base du concept d'automate ou d'« axe de référence » préalablement développé. Dans ce nouveau cadre formel, la plante simulée est en effet conçue comme un « graphe multi-niveaux »[3] généré par un processus stochastique. Ce processus peut être lui-même formellement remplacé par un « modèle dynamique probabiliste »[4] de type automate à transition d'états de Markov. Moyennant cette réécriture formelle, la théorie du renouvellement est très précieuse car elle permet ensuite le règlement du problème mathématique inverse qui consiste à remonter aux paramètres des processus une fois que l'on connaît leurs distributions empiriques sur le terrain[5]. Dans ce travail, AMAP établit un « pont » solide entre les simulations de plantes et les observations empiriques. Il devient possible d'ajuster et de valider clairement le modèle[6]. AMAPmod aura par la suite un rôle majeur dans les convergences d'AMAP avec les modélisations venant d'autres origines. Nous y reviendrons bientôt.

Devant le bilan de l'AIP et face à cette accélération comme à cette dynamique de cristallisation interne à AMAP dans ces années-là, le constat devient évident pour Coléno : il est plus raisonnable de continuer à inciter les « architectes du végétal »[7] à se rapprocher de leurs collègues physiologistes que d'imposer le mouvement inverse. Face à l'enthousiasme mitigé des

---

[1] En 1990, ils soutiennent tous les deux une thèse en sciences appliquées à la reconnaissance de la parole.

[2] Ingénieur en robotique et titulaire d'un DEA d'informatique, Barczi a été recruté par AMAP au début des années 1990 pour travailler à réécrire le logiciel de Jaeger en prenant soin des problèmes d'identification des paramètres. Voir [Bouchon, J., 1997], pp. 205-254. Jaeger ne pouvait en effet s'y atteler car, à partir de 1992, l'AMAP avait répondu favorablement à une demande de collaboration émanant de la Faculté de Médecine de l'Université Montpellier II, en la personne du professeur Joyeux, chirurgien et … voisin de de Reffye à Montpellier. Pendant quelques années (jusqu'en 1996), Jaeger dirige le projet de synthèse d'images médicales intitulé Corpus 2000. Il y développe des techniques de géométrie discrète pour visualiser des organes humains en 3D à partir de coupes tomodensitométriques. Un troisième doctorant informaticien de Strasbourg, Philippe Borianne (encadré par Pascal Lienhardt, un élève de Françon), y préparera même une thèse sur les topologies de dimension 2. Un logiciel, C2000, est rapidement mis au point par le CIRAD-AMAP et diffusé dans certains centres d'imageries partenaires. Le but avoué de de Reffye et Jaeger, à moyen-long terme, est d'aboutir à des logiciels de modélisation/simulation de croissance des organes animaux (Voir [Reffye (de), Ph. *et al*., 1996], p. 159). Mais à la faveur d'un changement de direction au CIRAD, la recommandation de ne pas se disperser faite à l'AMAP par les membres de la Revue Externe de1996 est prise très au sérieux. Et Jaeger aura rapidement ordre de recentrer son travail sur le métier du CIRAD : l'agronomie et le développement. En 1999, en guise de transition, on le charge de produire un rapport sur le « Rôle et les perspectives de l'informatique scientifique au CIRAD » avant de l'encourager fortement à revenir à la modélisation des plantes. Dans ce rapport, il ne fait aucune allusion à ce qui a pourtant été l'objet de son travail pendant près de 5 ans…

[3] [Bouchon, J., 1997], p. 146. Voir l'article synthétique [Godin, C. et Caraglio, Y., 1998].

[4] [Bouchon, J., 1997], pp. 187-191.

[5] « L'intérêt de l'application de la théorie du renouvellement est de permettre, à partir d'une mesure de type 'comptage', de déduire une information de type 'intervalle de temps' beaucoup plus directement interprétable du point de vue botanique puisque traduisant la notion de plastochrone apparent. En effet, la mesure au niveau 'intervalle de temps' serait extrêmement fastidieuse voire irréalisable dans de nombreux cas », [Reffye (de), Ph. *et al*., 1996], p. 61. Elle permet donc de quantifier des paramètres cachés derrière les modèles que sont les processus stochastiques.

[6] Voir [Reffye (de), Ph. et Houllier, F., 1997], pp. 987-988 : "A crucial point is that AMAPsim is linked to AMAPmod and that the theory of graphs and automata makes it possible to estimate the transition probabilities among the states from experimental data (which is not the case for most simulation methods which cannot be 'fed' by observations). There is thus a bridge between empirical observations of plant architecture and the morphogenetic simulations of AMAPsim, thus the possibility to adjust and validate the model".

[7] Selon l'expression de la page internet de l'INRA dédiée à l'AMAP : [INRA, architecte, 1998].

modélisateurs de l'INRA, il revient à l'AMAP seul de faire entrer des considérations physiologiques dans ses simulations. Ce constat et la décision qui s'en est suivie se sont donc concrétisés dans le rapprochement institutionnel entre le CIRAD et l'INRA au sein même de l'AMAP : suite à une nouvelle décision forte de Coléno, c'est donc le 1er janvier 1995 que l'AMAP devient un « Laboratoire associé INRA/CIRAD – Programme modélisation des plantes » même si les chercheurs du CIRAD préfèrent encore l'appeler « Unité de modélisation des plantes – AMAP ». D'un point de vue administratif, le rapprochement n'est pas commode : au niveau des concours, il n'y a pas vraiment de vision commune entre le CIRAD et l'INRA et les chercheurs du CIRAD sont obligés de repasser des concours INRA pour être recrutés. C'est une décision politique qui ne fait donc pas consensus à tous les niveaux.

Au 1er janvier 1995, de Reffye reste cependant toujours directeur de l'Unité et rattaché au CIRAD. Il est également Directeur de Recherches du département GERDAT. L'Unité comprend en tout 28 membres permanents[1] : 14,5 en modélisation des végétaux (6 botanistes, 1 physiologiste, 2 agronomes, 1 agroforestier et 4,5 informaticiens-mathématiciens). C'est dans cette équipe que se trouvent trois chercheurs de l'INRA. L'infographie regroupe pour sa part 5,5 personnes. Cette partie valorisation a entre-temps nécessité la création du poste de Directeur Administratif de l'Unité. Il est occupé par Alain Chauchard. En effet, certains chercheurs ne savaient plus s'ils devaient faire de la recherche ou du développement industriel. Ce poste permit de clarifier les attributions. De plus, les adaptations des premiers logiciels AMAP au support IBM ou HP telles qu'elles ont été lancées dès la fin des années 1980 n'ont jamais bien marché. Les programmes de calcul d'images classiques étaient très vite saturés et, sauf dans le cas des produits à destination des stations Silicon Graphics, il n'était donc pas possible de livrer une version d'AMAP où un véritable calcul d'image en temps réel s'effectuait. Seuls des logiciels de visualisation d'images précalculées étaient vendus pour les PC[2]. Des contrats ont été cependant signés avec Thomson Digital Image, Alias, Wawefront et Softimage.

Face au déclin des ventes en 1995 au regard des premiers résultats assez florissants du début des années 1990[3], la bipartition de l'unité est finalement préconisée par les rapporteurs de la première revue externe de 1996[4]. Ils se fondent pour cela sur le modèle de l'USDA (*United States Depatement of Agriculture*) qui conseille de séparer nettement la modélisation et l'industrialisation des logiciels[5].

La valorisation a donc progressivement été conçue autrement. Dans le cadre de l'équipe infographie de l'AMAP, et dans un but de commercialisation, René Lecoustre a d'abord longtemps travaillé à étendre la bibliothèque des plantes virtuelles. Pierre Dinouard, un temps responsable d'un sous-groupe d'AMAP intitulé « Unité d'Industrialisation des Logiciels (UNIL) », avait auparavant travaillé à régler des problèmes de portabilité sur Windows, notamment. Mais, en

---

[1] Pour ces chiffres, voir [Reffye (de), Ph. *et al.*, 1996], pp. 17-18.
[2] Voir l'historique de Pierre Dinouard *in* [Reffye (de), Ph. *et al.*, 1996], p. 165.
[3] Elles étaient tombés à 600kF par an : à comparer aux 1,2 à 1,5 millions de francs annuels que l'Unité avait pu gagner jusque là avec ses ventes de logiciel (avec une pointe à 2,5 millions de francs). Aux mêmes époques, pour son fonctionnement total (personnel + équipement), l'unité réclame environ 12 millions de francs par an. Voir [Houllier, F. et Varenne, F., 2000], pp. 18-19. L'unité est donc loin de subvenir à ses besoins en vendant du logiciel.
[4] Ce système de revue externe ou d'évaluation collective intervient tous les 5 ans et il permet de stimuler la recherche et la valorisation ainsi que de faire des préconisations. Il se fonde sur une analyse faite pendant 6 mois par des intervenants extérieurs. Elle donne lieu à débats et à publications. Ce système a été mis en place par Hervé Bichat à partir du modèle d'évaluation en cours dans les grands Instituts de Recherche Agronomiques comme l'IRRI (International Rice Research Institute : Institut de recherche américain sur le riz, fondé en 1971 et visant à promouvoir la recherche pour le développement en agronomie ; 15 autres IRI seront fondés par la suite sur ce modèle).Voir [Bichat, H. et Varenne, F., 2001], p. 13.
[5] [Pavé, A., 1996], p. 33.

1995, de Reffye charge la société *JMG Graphics* (qui changera de nom en 2001 pour devenir *Bionatics*) de distribuer les logiciels AMAP. Dinouard y sera par la suite détaché. Cette société est fondée autour de deux diplômés d'une école de commerce (Institut Supérieur de Gestion), Mathias Monribot et Stéphane Gourgout, que Chauchard avaient d'abord envoyés faire une étude de marché aux Etats-Unis. Après la Revue externe de 1996 et ses préconisations, les attributions de l'UNIL tombent donc progressivement et naturellement dans les mains de *JMG Graphics*[1]. Le CIRAD ni l'INRA ne se sentent finalement capables de vendre du logiciel.

En cette même année 1996, l'équipe « analyse d'image et télédétection », animée par Marc Jaeger, est composée de 2,5 personnes. La gestion et l'administration occupe enfin 5,5 personnes. À côté des permanents, AMAP dispose de 4 collaborateurs dont Claude Puech, qui succède à Jean Françon comme conseiller en image de synthèse. AMAP se développe donc surtout par opportunisme, en multipliant ses liens et ses collaborations. Et cela se produit désormais souvent à l'occasion de demandes externes.

L'épistémologie du « modèle général » à valeur empirique

Par ailleurs, dans ces années de consolidation (1995-1996), il se trouve que Philippe de Reffye produit quelques réflexions disséminées sur la nature nouvelle des modèles qu'il propose à l'agronomie. Il est intéressant d'en ressaisir l'esprit, car il paraît caractéristique d'un changement épistémologique majeur occasionné par l'émergence de la simulation informatique, en particulier aux yeux du praticien qu'il est. Tout d'abord, de Reffye voit un grand avantage dans la possibilité qu'ont ses modèles de simulation d'être calibrés sur des données de terrain, cela à la différence de ceux, trop théoriques, de l'école de Lindenmayer, par exemple. Leur caractère opérationnel, même s'il lui reste encore à faire ses preuves sur des problématiques précises d'amélioration de conduite culturale, paraît donc bien engagé.

Mais il est une autre revendication, plus fondamentale encore, et qui pointe inlassablement dans le Document Préparatoire à la Revue Externe de 1996 : c'est celle du droit à produire désormais des « modèles généraux ». Comme Bouchon le précisera plus tard, lors de l'AIP, de Reffye en appelle à la légitimité cette fois-ci bien établie, selon lui, de ce genre de modèles, à l'opposé des préconisations de l'école de la modélisation française qui avait toujours favorisé et autorisé les modèles pragmatiques spéciaux et régionaux. Dans ce document, après l'énumération des quatre types de modèles désormais implémentables dans l'infrastructure de simulation architecturale AMAP (modèle statistique, modèle de production végétale, modèle de compétition, modèle morphologique) de Reffye écrit en effet :

« En définitive, tous ces modèles se complètent les uns les autres et, de toute évidence, un modèle général qui engloberait à la fois les problèmes de morphologie et d'interaction avec le milieu aurait une polyvalence remarquable dans ses applications agronomiques. C'est cette approche qui est privilégiée à l'Unité de Modélisation des Plantes. »[2]

Plus loin, on peut lire :

[1] Actuellement (2004), Stéphane Gourgout est Directeur Commercial de *Bionatics*. Cette société possède l'exclusivité pour la diffusion de la technologie AMAP, excepté le moteur de croissance. C'est-à-dire qu'elle possède des droits sur tout l'environnement logiciel (modelage des végétaux…). Elle reverse de l'argent à l'Unité AMAP en fonction de ses ventes.

[2] [Reffye (de), Ph. *et al.*, 1996], p. 67.

« Le choix d'une représentation simplifiée de la végétation est avant tout d'ordre pratique. La description géométrique et biométrique d'un couvert in situ *est en effet très laborieuse et toujours incomplète. À l'inverse, les plantes virtuelles sont des objets informatiques dont la géométrie et la topologie sont complètement décrites. Il devient donc possible de mettre en œuvre des modèles numériques de simulation exploitant le plus complètement possible les informations disponibles […] Le choix a été fait de développer des modèles aussi précis et détaillés que possible afin de mieux analyser les phénomènes étudiés et, le cas échéant, tester et caler les modèles classiques [analytiques]. »*[1]

Plus loin, encore :

« Il est clair qu'il faut tendre rapidement vers un modèle informatique d'arbre qui puisse à la fois servir en simulation, à l'agronomie, à la botanique, à la physiologie, à la mécanique et à la qualité du bois. La simulation de l'arbre se trouve en effet au carrefour de ces disciplines scientifiques et leur permet pour la première fois de communiquer réellement entre elles. »[2]

La modélisation « fragmentée » (selon notre expression) et la simulation permettraient donc une « polyvalence » inédite qu'il ne faudrait désormais plus craindre. Cette polyvalence est à opposer à la monovalence maintes fois conseillée dans l'épistémologie des modèles jusqu'alors[3]. De Reffye retrouve ici un intérêt, qui a toujours été le sien, pour des « lois des plantes ». Mais contre les mathématiciens et théoriciens aprioristes, trop pressés pour mesurer la vraie nature des phénomènes sur le terrain, de Reffye se réclame de la mesure objective des plantes. Son versant biométrique se retrouve ici. La variabilité du vivant est présente mais elle a été conjurée par la simulation informatique. Car elle n'a plus seulement été résumée par des paramètres mais elle a été rendue synthétisable par des algorithmes : ce sont ces algorithmes qui peuvent figurer au titre de lois des plantes, en quelque sorte, même si on perd par là la notion de modèle mathématique et qu'il faut lui préférer celle, plus modeste, de « modèle numérique ». Sur ce point d'ailleurs, la terminologie de de Reffye reste flottante en 1996 : faut-il parler de « simulation », de « modèle numérique » ou de « modèle informatique » ? Ce flottement prouve que la nature de ce modèle est clairement vécue comme différente des autres, sans que le praticien trouve à réutiliser de manière stable et satisfaisante les catégories antérieures.

Il apparaît néanmoins clairement qu'il n'est plus besoin de recourir à la rhétorique de la complexité de la nature, infinie et donc quasi-divine, comme c'était le cas dans l'épistémologie de l'école française de modélisation. Au contraire, et *a posteriori*, cette rhétorique semble avoir servi à masquer une impossibilité que de Reffye décide, quant à lui, de trouver prosaïque (voir l'expression « choix […] d'ordre pratique »). Il n'éprouve plus le besoin de la sacraliser ou de l'interpréter en termes de tabou ou d'impossibilité constitutive due à la finitude humaine : pour lui, il s'agit simplement d'une incapacité technique et momentanée de prendre en compte suffisamment d'informations dans les modèles alors qu'elles étaient de toute façon disponibles.

Cependant, cette polyvalence de la simulation, de la « plante virtuelle » a un coût : elle cause un changement de statut épistémique dont de Reffye prend également conscience, à cette époque. Comme Bouchon essaiera de le dire un an plus tard aux écophysiologistes, la simulation

[1] [Reffye (de), Ph. *et al.*, 1996], p. 73.
[2] [Reffye (de), Ph. *et al.*, 1996], p. 90.
[3] Pour un approfondissement de cette question épistémologique, voir notre article [Varenne, F., 2003b].

n'est plus tant un modèle qu'un double de la réalité. À ce titre, elle joue plutôt un rôle de réplication virtuelle, de double empirique du réel, plutôt que de résumé symbolique ou de modèle formel à visée directement cognitive :

« Le modèle conçu au CIRAD est original car il est développé à partir des connaissances qualitatives de la botanique et de l'architecture végétale, auxquelles sont rajoutées celles, quantitatives, acquises au cours d'expériences agronomiques réalisées au CIRAD en outre-mer ou dans des centre de recherche agronomique français. Son approche est donc de nature expérimentale et non algorithmique. »[1]

Dans ce passage, de Reffye oppose donc une approche algorithmique à la nature expérimentale, clairement assumée ici, de la simulation. L'approche algorithmique est à comprendre au sens strict d'une mise à disposition d'un modèle mathématique *a priori* calculable en une série d'opérations purement mathématiques, homogènes entre elles et en nombre fini. Ce type de modélisation est mathématique au sens strict. Elle permet de comprendre le phénomène modélisé, au moins en droit, c'est-à-dire qu'elle autorise la restitution en son esprit du geste mathématique unique d'où procède le modèle. Elle s'oppose à la modélisation fragmentée qui ne promet plus de faire comprendre. La simulation produit quant à elle des « maquettes numériques », « des objets informatiques »[2] compacts et opaques sur lesquels des expérimentations virtuelles peuvent en revanche être faites. La simulation devient donc nettement un terrain d'expérimentation. Cette expérimentation est faite par procuration à partir du moment ou le modèle de simulation est correctement calibré sur le terrain réel et ce d'un point de vue quantitatif. Ce faisant, on ne se livre qu'à des observations d'« individus »[3], de doubles d'objets singuliers, eux-mêmes singuliers, dont la caractérisation et la généralité restent problématiques. Toujours est il qu'à cette époque, de Reffye pense que l'on est désormais pleinement fondé à parler « d'expérience agronomique virtuelle »[4].

Une maquette informatique comme support d'expériences virtuelles

Ce sont les travaux en simulation du « climat radiatif » qui illustrent le mieux cette tendance de l'AMAP à utiliser les représentations architecturales dans leur complexité comme autant de maquettes ou de modèles servant ensuite à des expérimentations virtuelles. Or, ils ont pris naissance dans le cadre d'une demande agronomique concrète et particulière.

À la fin des années 1980, Jean Dauzat, ingénieur agronome et titulaire d'une thèse en écologie, est intégré à l'équipe. Sa tâche est de développer les applications agronomiques des simulations. En 1990, à l'occasion d'une ATP interne au CIRAD (Action Thématique Programmée) et en lien avec le département des cultures pérennes (CP), il publie un rapport dans lequel il propose d'utiliser les simulations architecturales pour l'estimation des transferts radiatifs au sein d'une palmeraie (palmiers à huiles). Il s'agit d'évaluer précisément la lumière interceptée, la lumière transmise sous le couvert ainsi que la réflectance directionnelle. Le but agronomique clair est d'optimiser la densité des cultures associées (cultures sous couverts). Or, les modèles mathématiques classiquement utilisés pour évaluer les échanges radiatifs au sein d'un couvert

[1] [Reffye (de), Ph. *et al.*, 1996], p. 115. C'est nous qui soulignons.
[2] [Reffye (de), Ph. *et al.*, 1996], p. 115.
[3] [Reffye (de), Ph. *et al.*, 1996], p. 115.
[4] [Reffye (de), Ph. *et al.*, 1996], p. 12.

végétal recourent à des représentations des plantes très simplifiées. Les houppiers ou les couronnes y sont figurés par des cônes ou des ellipsoïdes[1]. Comme dans une représentation biométrique traditionnelle, la répartition des feuilles y est donc considérée comme aléatoire. Et l'on recherche l'effet moyen du couvert végétal sur l'ensoleillement au cours d'une journée. Mais ces modèles ne tiennent pas compte de l'hétérogénéité constatée et mesurée de l'éclairement au sol. L'optimisation de la densité de plantation n'est donc pas assurée.

Entre 1989 et 1994, Dauzat, aidé de Lecoustre, utilise des mesures architecturales précises faites en Côte-d'Ivoire afin de construire des maquettes réalistes de palmiers. Dans un premier temps, il confirme l'hétérogénéité de l'ensoleillement en procédant à des mesures de rayonnement au sol au moyen de capteurs, mais aussi à des mesures du rayonnement diffus sous la palmeraie. Ensuite, découpant la surface en triangles élémentaires, il trouve que le taux de transmission moyen par triangle obtenu par simulation au moyen du logiciel AMAPpara est très proche (à une erreur près de 10%) de celui qui a été mesuré[2]. La simulation rend donc bien compte de l'hétérogénéité du rayonnement. Recourant à ces mêmes maquettes, Dauzat simule enfin le climat radiatif total, avec ses rediffusions et ses réinterceptions, en faisant suivre à l'ordinateur l'histoire, c'est-à-dire le devenir, d'un grand nombre de rayons incidents provenant du soleil tout au long d'une journée. Pour obtenir un climat stabilisé, la simulation exige de procéder à un nombre très grand de ces « lancers de rayon » virtuels : entre 1 et 2 millions pour une petite scène de palmeraie. Dauzat commente : « Cette méthode est très consommatrice de temps de calcul. En revanche, cette approche mécaniste est très rigoureuse et permet de détailler finement les échanges radiatifs. »[3] Dauzat a donc montré que la cartographie du bilan radiatif total d'une plantation est accessible avec précision si on en reproduit les détails architecturaux par ordinateur.

De même, c'est une méthode semblable qui permet de fournir une image de la réflectance, vue du dessus, d'une scène végétale complexe ; d'où le lien qui se fait très vite avec la problématique d'interprétation d'images produites par télédétection (avions, satellites…). Dans ce cadre-là, d'un point de vue conceptuel, la simulation botanique architecturale, renouant avec les origines de la simulation numérique, permet donc de contourner les problèmes de non calculabilité :

« Le modèle de lancer de rayons développé a pour objectif la simulation la plus précise possible de la réflectance du couvert. Il est trop complexe pour être inversé. Par des expériences de simulation il est néanmoins possible d'établir des relations entre un signal mesuré et diverses caractéristiques du couvert. Les relations obtenues peuvent ensuite être inversées. »[4]

Dans cette utilisation de l'ordinateur, les maquettes, étant elles-mêmes le fruit de simulations préalables, deviennent à leur tour le terrain d'un autre type de simulation : celle de l'éclairement. À la fin de leur construction, leur aspect n'est donc pas encore résumé de manière globale par un modèle ou une formule. Il sert de nouveau en tant que tel, dans sa rugosité même et dans son hétérogénéité conservée. C'est là que la simulation architecturale devient un terrain empirique à part entière. À maintes reprises d'ailleurs, Dauzat indique que cette simulation sur « maquette informatique » contredit quantitativement les modèles condensants habituels. Cette simulation sur maquette peut donc servir à *tester* des modèles mathématiques. Avec la simulation de la

[1] [Dauzat, J., 1994], p. 81.
[2] Voir figure 6a *in* [Dauzat, J., 1994], p. 86.
[3] [Dauzat, J., 1994], p. 88.
[4] [Reffye (de), Ph. *et al.*, 1996], p. 134.

réflectance, elle sert aussi à *interpréter*, de manière inductive il est vrai, des images de télédétection. C'est-à-dire qu'elle peut servir à décider quel type de plantation et quelle essence d'arbre se trouvent représentés sur l'image.

Au cours des années 1990, Dauzat poursuivra la conception et le raffinement de modèles d'échanges radiatifs au moyen des simulations architecturales à 3D. Plusieurs thèses seront soutenues jusqu'en 2002 au moins, sur ce sujet et avec cette approche[1]. Dès 1995, Dauzat participe au PNTS (Programme National de Télédétection Spatiale) en y proposant, en collaboration avec l'Unité de Bioclimatologie de l'INRA de Bordeaux et de Grignon, une « étude de la réflectance de peuplements de pins maritimes de la forêt landaise »[2]. Il contribue également à l'interprétation de données radar acquises préalablement par le CIRAD-Forêt au cours d'une campagne de mesures aéroportées menée sur une plantation d'eucalyptus congolaise.

Mais, à la fin des années 1990, une question s'impose à l'AMAP : peut-on développer le même usage de la simulation, cette sorte de « sur-simulation », dans le domaine plus directement intéressé à l'évaluation de la masse de matière produite (bois, fruits, …), ce qui est un axe majeur en agronomie ? La suite montrera que cette idée d'étendre la simulation conçue comme terrain empirique à d'autres problématiques, si elle a pu dominer les perspectives de de Reffye et de son équipe dans la première moitié des années 1990, se révèlera un peu optimiste même si elle n'est pas fausse sur le principe. Il y a deux obstacles qui vont se présenter très vite dans les années qui suivent. Tout d'abord un obstacle technologique. Disposer d'une « plante virtuelle » purement architecturale (en fil de fer) nécessite déjà une mobilisation de mémoire telle que la vitesse de calcul est affectée considérablement : surcharger de surcroît cette maquette avec des modules physiologiques très lourds, à la différence du module encore relativement léger des « lancers de rayon »[3], cause dès le départ des problèmes de calculabilité pratique, même pour les plus gros ordinateurs, ce dont témoigne déjà le travail préparatoire fait avec Houllier dès 1993 dans le cadre de l'AIP.

---

[1] Voir les thèses de Pierre Guillevic (1999) et Delphine Luquet (2002), par exemple. Dauzat y est rapporteur et son travail sert de référence. C'est même un cadre de réflexion et un point de départ assumés dans la thèse de Delphine Luquet sur « Le suivi hydrique des plantes par infrarouge thermique ». Voir [Guillevic, P., 1999] et [Luquet, D., 2002]. Elle a été engagée comme chercheuse au CIRAD-AMIS (amélioration des méthodes pour l'innovation scientifique) en 2003.

[2] [Reffye (de), Ph. *et al*., 1996], p. 135. En fait, dans ce cadre pratique-là, Dauzat doit déjà renoncer à simuler le pin aiguille par aiguille : la simulation de lancer de rayon demanderait un temps prohibitif, à la différence de ce que demandaient les quelques palmes du palmier. Il faut dont qu'il remodélise de manière conique et simplifiée des « unités de croissance feuillées » rassemblant un grand nombre d'aiguilles… Voir *ibid.* Cette méthode empirique de simulation n'est donc pas valable *en pratique* pour toute architecture d'arbre à cause de la limitation en puissance et en mémoire des ordinateurs en ce milieu des années 1990.

[3] Ce modèle révèlera plus tard lui aussi ses limites, notamment en vitesse de calcul. À partir de l'année 2000, dans le cadre du rapprochement avec l'INRIA dont nous parlerons plus loin, Cyril Soler et François Sillion, tous deux chercheurs à l'INRIA, et secondés par Frédéric Blaise (AMAP), adapteront des algorithmes issus de l'infographie pour simuler plus efficacement l'énergie lumineuse radiative sous un couvert végétal. Cette question de la radiosité de la lumière est en effet ancienne en infographie où il faut rendre des scènes réalistes du point de vue de l'illumination au moyen de techniques de rendu assez développées. Voir le rapport de recherche [Soler, C., Sillion, F., Blaise, F., Reffye (de), Ph., 2001]. Les auteurs choisissent une technique hiérarchique où, à échelle globale, des réflectances et des transmittances équivalentes sont calculées pour les grandes structures de l'arbre. On montre que le raffinement jusqu'à la feuille individuelle (avec un calcul exact) est toujours possible au moyen d'une instanciation hiérarchique, c'est-à-dire d'une descente dans l'échelle des classes de données. Mais cela nécessite des calculs plus conséquents. En 2002, des ordinateurs parallèles commencent à être utilisés à cette fin. Voir *ibid*., p. 18. Ce qu'il faut retenir, c'est le fait que, comme dans le cas de l'algorithme de Bresenham chez Blaise (1991), une pure technique mathématique et algorithmique d'infographie peut servir à résoudre indirectement un problème propre aux sciences de la nature. Ici, c'est dans le cadre du calcul d'une valeur énergétique sur une maquette simulée. L'infographie n'est donc pas nécessairement à la traîne de la science expérimentale, physique ou biologique. Elle sert parfois d'instrument formel de simulation objective et de calcul.

Ensuite, il y a un problème méthodologique. En 1996, de Reffye entend faire de l'expérimentation agronomique virtuelle[1]. Or, l'histoire de l'agronomie a montré pour sa part qu'il n'y a pas d'expérimentations réelles utilisables sans distinctions claires entre les facteurs contrôlés et les facteurs non contrôlés. Il faut pouvoir procéder à des expériences contrôlées. Comme le montrait l'approche fondatrice de R. A. de Fisher, il faut qu'il y ait une certaine interaction de l'expérimentateur avec les entrées du terrain, que l'on sache au moins leur répartition aléatoire si l'on n'en commande pas l'expression. L'opacité construite de la simulation, gage de son réalisme et de sa complexité, devient ici vite un obstacle : il faut y désintriquer quelque peu les liens pour voir comment procèdent les optimisations. Il faut en revenir à un certain désir de comprendre. Là est la raison majeure de la troisième convergence à laquelle l'AMAP a en fait progressivement et assez consciemment procédé depuis 1998 : la convergence avec les mathématiques des graphes puis avec l'automatique et, de fait, la réconciliation tardive avec la simulation logiciste à la Lindenmayer. Après une naissance dans la simulation fractionnée ou les mathématiques calculables n'avaient plus la priorité, il semble qu'il faille en quelque sorte « re-mathématiser » la représentation de la plante. Tel est le moteur principal de la troisième et actuelle convergence à laquelle se livre AMAP.

[1] Voir [Reffye (de), Ph. et Houllier, F., 1997], p. 991 : "The approach reviewed in this paper aims at developing agronomic or sylvicultural virtual experiments."

CHAPITRE 31 - La troisième convergence : re-mathématiser (à partir de 1998)

Jusqu'à présent, nous avons pu voir que, dans les premières années de la décennie 1990, la modélisation en sylviculture, notamment en la personne de François Houllier, s'était fortement rapprochée de la simulation architecturale pratiquée à AMAP. Or, en 1993, avant même le départ de François Houllier de l'ENGREF de Nancy pour l'Inde, de Reffye avait été membre du comité d'évaluation du programme « croissance » de l'INRA, programme alors dirigé par Jean Bouchon. À cette occasion, de Reffye et Houllier s'étaient rapprochés encore. Et ensemble ils avaient évoqué l'éventualité que Houllier sollicite à terme le poste de directeur de l'AMAP à son retour de Pondichéry.

C'est chose faite le 1er janvier 1998 : Houllier devient responsable de l'AMAP à la place de de Reffye. Du point de vue de l'INRA, il est directeur du « Laboratoire associé CIRAD-INRA Modélisation de l'architecture des arbres forestiers ». Du côté du CIRAD, il est dit responsable du « Programme modélisation des plantes ». Cette décision, elle aussi assez largement appuyée par Coléno, est d'abord regardée avec surprise de la part de la direction du CIRAD qui s'étonne d'avoir à se dessaisir d'un de ses éléments les plus dynamiques et productifs. En fait, même s'il reconnaît le travail inestimable de son collègue Chauchard sur le plan de l'organisation du laboratoire, de Reffye voit son temps dévoré à 50% par des responsabilités administratives diverses (dont la direction du GERDAT). Or, cela fait quinze ans qu'il dirige son laboratoire. Il éprouve une certaine lassitude. Surtout, il souffre de ne plus pouvoir s'engager à temps plein dans la recherche à un moment où il perçoit que des convergences prometteuses sont sur le point d'aboutir au niveau conceptuel. Et il ne voit pas qu'elle puissent réellement se développer sans son appui constant. Il veut donc être libéré de ces contraintes pour pouvoir se consacrer de nouveau à la recherche. La nomination de Houllier est une opportunité pour lui.

Le premier modèle mixte structure-fonction : « l'efficience de l'eau » (1997-1999)

Car, entre-temps, à partir de 1996, intervient une innovation conceptuelle de poids dans la modélisation que propose AMAP. Alors que la première tentative de couplage de la simulation architecturale avec l'écophysiologie avait fourni des résultats mitigés, lors de l'AIP, et que les limites en calcul promettaient de se présenter rapidement, de Reffye a l'idée de recourir à une loi simple et classique en écophysiologie : la loi de l'efficience de l'eau. Cette loi phénoménologique, bien connue des écophysiologistes depuis les années 1930, postule que la matière créée par photosynthèse est constamment proportionnelle à la transpiration de la plante[1]. Cela est valable dans les cas où la plante n'est pas soumise à un stress hydrique. Or, en première approximation, cette transpiration ne dépend elle-même que de l'architecture. Comme le logiciel AMAPpara rend compte du programme de croissance primaire dans sa séquence réelle et sa topologie, s'il est possible d'évaluer à chaque étape la transpiration, la production de matière sera elle-même

[1] Voir l'article « Eau – l'eau en agriculture » de l'*Encyclopaedia Universalis* (écrit par Marcel Robelin, maître de recherche à l'INRA), édition 1989 (CDROM 1995), Tome 7, p. 802c : « Il existe une relation de simple proportionnalité entre la transpiration et la production de matière sèche. Bien entendu la relation s'arrête au niveau de la transpiration et de la production maximales fixées par le climat et la plante. » Des travaux allant en ce sens ont été publiés dès 1933. Voir l'article de J.-F. Leroy *in* [Taton, R., 1964, 1995], p. 737.

précisément évaluable. Il ne restera plus qu'à l'allouer différentiellement pour simuler la croissance secondaire des organes. Or, cela est également possible car on dispose pour ce faire des lois d'allométrie locales pour chaque organe. Pour de Reffye, c'est là une occasion d'aller à l'école de l'écophysiologie sans pour autant entrer dans les conflits nombreux qui animent le monde de l'écophysiologie autour des modèles régionaux. À l'époque, beaucoup d'écophysiologistes français s'indignent et se dressent contre cette nouvelle intrusion qu'ils jugent inopportune et irrespectueuse de la complexité des phénomènes considérés. Au-delà des approches de quantifications réductionnistes classiquement biochimiques, à une échelle plus intégrée, les écophysiologistes ne connaissent en général pour toute modélisation que celle qui est à base de processus et qui recourt à des compartiments fonctionnels[1]. Certains pourtant, comme Pierre Cruiziat vont finalement le soutenir dans sa démarche. Cruiziat reconnaît en effet la nécessité de dépasser les modèles à compartiments pour « spatialiser » les modèles d'arbres fonctionnels[2].

À partir de 1997, avec Frédéric Blaise, François Houllier, Thierry Fourcaud et Daniel Barthélémy, de Reffye adapte donc AMAPpara de manière à y intégrer cette loi de l'efficience de l'eau[3]. Le nouveau modèle procède par cycles décomposables en 3 étapes :

1) Le moteur de croissance architecturale détermine la croissance primaire des axes et des organes ; la matière créée dans le cycle précédent est allouée aux feuilles et aux entre-nœuds ; chaque organe est pour cela traité comme un puits de matière ; les lois d'allométrie sont utilisées pour faire pousser les organes. Toute matière produite est consommée.
2) La structure géométrique calculée permet de quantifier la transpiration en prenant en compte l'architecture du réseau hydraulique modifiée par la croissance précédente. La notion de résistivité hydraulique (analogie classique avec l'électricité) permet alors la sommation des résistances. Elle permet le *calcul analytique* de la distribution du potentiel hydrique.
3) La croissance des cernes des axes et celle des fruits est enfin calculée à partir de leurs puits et de leur expansion. L'accroissement en épaisseur des axes se fait par un dépôt uniforme de matière le long des branches[4].

C'est donc à partir de ce travail que de Reffye commence à quitter l'approche par la simulation seule. Il s'agit en effet d'un couplage entre une approche par simulation stochastique (incarnant toujours une manifestation macroscopique du programme génétique de la plante) et une

---

[1] Voir la présentation de Pierre Cruiziat *in* [INRA, 1997], p. 9. Voir également l'étude comparative serrée de [Deleuze, C., 1996]. De manière significative, dans sa thèse, Christine Deleuze (X-ENGREF) ramène les modèles architecturaux de de Reffye à une espèce d'« allométrie » généralisée, ce qui signifie qu'elle y perçoit au mieux un caractère phénoménologique, « intuitif » dit-elle. Or, cela lui répugne et elle considère ces modèles comme devant être « vérifiés », *ibid*., p. 6. C'est-à-dire qu'elle leur reproche d'une part de séduire en surface et de n'être pas explicatifs pour autant. Et, d'autre part, elle met en cause, ce qui est plus grave, leur calibration. En tout et pour tout, elle ne cite d'AMAP qu'un seul article, *ibid*., p. 232. Dans le milieu des modélisateurs en agronomie et en sciences de l'environnement que nous avons pu fréquenter à la fin des années 1990, lors de différents colloques, nous avons constaté que l'approche de de Reffye était encore souvent mal connue et un peu vite assimilée aux modèles mathématiques de phyllotaxie, avec le certain dédain qui accompagnait ce rapprochement.

[2] Ingénieur agronome de Paris-Grignon. Au début des années 1970, il passe un doctorat en physiologie des plantes à Paris. Chercheur à l'INRA, son travail a touché essentiellement aux transferts hydriques dans les plantes. Il travaille actuellement en écophysiologie des arbres à l'INRA de Clermont-Ferrand. Depuis 1990, son unité de rattachement est le PIAF. Elle est associée à l'Université Blaise Pascal depuis cette date. Cruiziat milite pour la spatialisation des modèles fonctionnels pour deux raisons : 1 - la nécessaire prise en compte de l'hétérogénéité géométrique du couvert végétal et donc de l'ensoleillement, 2 - la nécessaire prise en compte de l'hétérogénéité morphologique des organes à l'intérieur du houppier et des compétitions internes qui s'y trouvent. Voir [INRA, 1997], p. 10.

[3] Voir [Reffye (de), Ph., Blaise, F., Fourcaud, T., Houllier, F. et Barthélémy, D., 1997].

[4] [Reffye (de), Ph., Blaise, F., Fourcaud, T., Houllier, F. et Barthélémy, D., 1997], p. 130 et [Nosenzo, R., Reffye (de), Ph., Blaise, F. et Le Dimet, F.-X., 2001], p. 155.

approche fonctionnelle où les relations mathématiques sont exprimables de manière analytique à chaque étape. Les auteurs montrent en effet que l'on peut écrire une « formule de récurrence reliant la croissance d'un arbre (transpiration, assimilation et allocation) à sa structure interne et à son architecture aérienne et racinaire » :

$$Q_n = \frac{k.\Delta\Psi_n}{\sum_{j=1,2}\left(r_j A_j + r_j' B_j \left(\frac{Q_{n-1}}{f_{jn}}\right)^{1+\alpha} + \rho_j C_j \left(\sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{Q_{i-1}}{f_{ji}}\right)^{\frac{1+\alpha}{2}} \right)^2 \right)} . Q_{n-1}$$

Légende :

« Qn = quantité de matière sèche fabriquée à l'étape n ; ΔΨn = différence de potentiel hydrique (entre les feuilles et le sol) à l'étape n ; k = efficience de l'eau ; j=1 pour la partie aérienne ; j=2 pour la partie souterraine ; f_{jn} *= nombre d'unités de croissance actives pour l'assimilation (j=1) et l'alimentation en eau (j=2) ;* r_j *= résistance à la transpiration (feuilles) ou à l'absorption d'eau (« poils absorbants » [du système racinaire]) ;* r_j' *= résistance à la circulation de la sève brute dans les unités de croissance terminales ;* ρ_j *= résistivité des cernes conducteurs ; α = paramètre qui décrit la morphologie des unités de croissance ;* A_j, B_j, C_j *= paramètres qui dépendent de la morphologie de la plante et des règles d'allocation des assimilats. »*[1]

La simulation procède donc encore étape par étape de croissance. Mais, à chacune de ces étapes, certaines variables décisives ne sont plus l'objet d'une construction probabiliste comme c'est encore le cas dans le logiciel AMAPsim. La variable Qn, par exemple, est calculée de manière analytique en fonction des résultats de la simulation architecturale à chaque étape. La plasticité des modèles architecturaux (qui conservent par ailleurs leur déterminisme à l'intérieur d'un cadre stochastique) est ainsi contrôlée par l'architecture elle-même dans son rapport à l'efficience de l'eau. Grâce à la loi phénoménologique de l'efficience de l'eau[2], il y a donc un début d'effet en retour de l'architecture sur la production par la photosynthèse et de cette production sur l'expression du modèle architecturale (sa vitesse). Au final, on dispose bien d'un début de modèle de régulation où le modèle architectural est contrôlé par le modèle de production à base de processus et le contrôle en retour[3]. C'est dans un passage comme celui-ci que l'on perçoit combien l'idée du « tout simulation » est désormais battue en brèche, selon de Reffye :

« L'avantage de posséder un modèle mathématique explicite en amont d'un programme informatique de simulation est double. Il permet de comprendre le rôle des paramètres

[1] Pour la formule et la légende, voir [Reffye (de), Ph., Blaise, F., Fourcaud, T., Houllier, F. et Barthélémy, D., 1997], p. 131.
[2] Qui est donc en fait un modèle mathématique validé.
[3] Voir [Reffye (de), Ph. et Houllier, F., 1997], p. 991 : "In this case, the double regulation, of the ecophysiological processes by the structure of the plant and its neighbours, and of the morphogenetic programme by the availibility of the internal and external resources produced or consumed by the physiological processes (e.g. photosynthates, water, light, space), is explicitly considered in the very same model."

architecturaux dans la production végétale, d'une part, et de vérifier le bon fonctionnement numérique du logiciel sur des architectures dont la structure topologique est définie analytiquement, d'autre part. Cette condition est nécessaire pour aborder la simulation des plantes réelles. »[1]

Le souci de « comprendre » plus que de simuler se fait désormais nettement jour dans ce travail. On constate que c'est la convergence avec l'agronomie et ses problématiques de production contrôlée qui entraîne elle-même un retour vers la modélisation mathématique compréhensive.

Le second avantage invoqué dans le passage ci-dessus est celui de la vérification du programme de modélisation. Ce souci a en revanche été constant chez de Reffye. Il en a eu conscience dès sa thèse de 1979 : rappelons qu'il s'obligeait à trouver un arbre entièrement calculable analytiquement pour vérifier que la simulation stochastique de cet arbre simple donnerait par ailleurs les mêmes résultats.

Finalement, parce qu'il semble bien plus manipulable et calibrable que le modèle mixte proposé lors de l'AIP, ce modèle enté sur AMAPpara et intitulé plus tard (en 1999) AMAPhydro puis AMAPagro, fait par la suite l'objet de tests de validation serrés, d'abord sur le cas du cotonnier. Les résultats qualitatifs et quantitatifs sont alors tout à fait satisfaisants[2]. Le modèle est considéré comme validé. Il fait l'objet d'une publication importante dans la revue *Agronomie*[3], notamment. Dans ce contexte, par « validation », l'équipe de de Reffye entend « la totale reconstruction cycle par cycle de la plante par une biomasse fabriquée et répartie dans une architecture tridimensionnelle à partir des paramètres mesurés ou calculés sur les données expérimentales »[4].

Cependant, à côté de ce retour vers les modèles mathématiques, principalement occasionné par le besoin de calculer des modèles mixtes, on sait qu'AMAP affermit et affine ses formalismes en leur donnant une allure moins improvisée, notamment avec les travaux de Godin et Guédon. Dès le début des années 1990, ce travail de formalisation portait en germe la possibilité d'une comparaison plus directe si ce n'est celle d'un rapprochement même avec les techniques de simulation logiciste issues de l'école de Lindenmayer. Ce rapprochement a bien eu lieu en effet. Pourtant, dans cet épisode remarquable, AMAP n'a pas été seul à faire un pas vers l'autre pour rendre possible la réconciliation. Il a fallu qu'un souci de graphisme puis de prise en compte de détails botaniques, géométriques et stochastiques se fasse lui aussi jour progressivement, quoique tardivement, dans cette école formaliste. Or, cette inflexion a elle-même une histoire. Afin de comprendre cette convergence récente et décisive entre l'école des L-systèmes et celle de modélisation fragmentée et de simulation architecturale, il nous faut donc rapporter rapidement les étapes antérieures de l'évolution des L-systèmes à partir de l'époque où nous l'avions laissée.

Evolution de la simulation logiciste : 1984-1994

Tout d'abord, pendant les années 1980, les L-systèmes restent encore massivement un objet de préoccupation pour informaticiens, mathématiciens et linguistes, cela à la suite d'une appropriation dont nous avons rapporté plus haut les principaux enjeux. Toutefois, de 1976 à

[1] [Reffye (de), Ph., Blaise, F., Fourcaud, T., Houllier, F. et Barthélémy, D., 1997], p. 130.
[2] Voir [Reffye (de), Ph., Blaise, F., Chemouny, S., Jaffuel, S. et Fourcaud, T., 1999].
[3] [Reffye (de), Ph., Blaise, F., Chemouny, S., Jaffuel, S. et Fourcaud, T., 1999].
[4] [Nosenzo, R., Reffye (de), Ph., Blaise, F. et Le Dimet, F.-X., 2001], p. 160.

1984, nous avions vu Pauline Hogeweg puis Alvy Ray Smith s'affronter, de manière assez isolée il est vrai, à la difficulté de plonger une grammaire formelle dans un espace géométrique. Le but clair était déjà de rendre le modèle logiciste susceptible de se prêter à terme à des validations quantitatives au regard de mesures de terrain. En fait, dans les années 1980, les L-systèmes restent encore massivement un outil pour des préoccupations théoriques. Cependant, les fractales, cette sorte de mathématiques du concret, font, on l'a dit, forte impression dans les milieux de l'informatique graphique alors en plein essor. Mais la solution des graftals de Smith qui, pourtant, les assouplit, paraît encore bien rigide. Cette solution ne sera d'ailleurs pas véritablement reprise. Une autre approche va être plus féconde.

De son côté en effet, à partir de 1971, un professeur d'informatique de la *University of Western Ontario*, Andrew I. Szilard, s'était intéressé plus particulièrement aux L-systèmes. En 1979, lorsque les fractales commencent à être populaires, c'est dans la revue de son université qu'il publie avec son élève R. E. Quinton un article dans lequel il montre que les L-systèmes peuvent engendrer des courbes fractales. Le formalisme logiciste des L-systèmes s'avérait donc au moins aussi souple si ce n'est plus que l'approche mathématique habituelle de Mandelbrot. L'idée consistait à introduire parmi les axiomes du L-système des règles de rotation sur le plan en plus des règles classiques de réécriture de symboles. Il apparaissait donc que les L-systèmes ne nécessitaient plus une interprétation géométrique surajoutée ; ils généraient eux-même un dessin géométrique sur le plan, bien que ce dessin restât encore discrétisé et assez peu souple formellement.

C'est en 1985 que cet article, à la publication confidentielle, retient l'attention d'un professeur en informatique et infographie de l'Université de Régina, Przemyslaw Prusinkiewicz. Ce dernier a un parcours hors du commun. Il est polonais d'origine. Il avait fait des études d'informatique à l'Université Technique de Varsovie entre 1970 et 1979 avant de devenir professeur à l'Université de Science et Technologie d'Alger de 1979 à 1982. Sa spécialité initiale touchait les problèmes de tolérance aux erreurs dans les calculs numériques. C'est d'Alger qu'il eut l'opportunité de rejoindre ensuite l'Université de Régina. Disposant du matériel adéquat (des stations Silicon Graphics), Prusinkiewicz y faisait évoluer son travail vers l'informatique graphique. Et c'est enfin par ce biais qu'il a d'abord vent des travaux effectués auparavant par les élèves et collègues de Seymour Papert au Laboratoire d'Intelligence Artificielle du MIT. Prusinkiewicz en suivra les idées. Rappelons-en ici brièvement l'esprit : ce laboratoire avait été fondé par Papert et Minsky au milieu des années 1960. Papert était mathématicien et avait travaillé avec Piaget, à Genève. Son approche en mathématique était donc teintée de constructivisme. Un de ses premiers projets a consisté à développer un type de langage de programmation qui, à partir de commandes de mouvements simples destinées à des « tortues » (et qui étaient au départ des robots mobiles sur un plan) simulait ou aidait à un apprentissage cognitif pas à pas et constructif. C'était là rejoindre et tester, sur des modèles d'abord physiques, l'intuition centrale de Piaget selon laquelle les concepts ont une source sensori-motrice. Ce langage fut intitulé LOGO dès 1967. Il fut construit sur la base du langage LISP, créé en 1960. Il servit donc d'abord à simuler le comportement animal. Mais en 1975, Harold Abelson et Andrea di Sessa, alors chercheurs dans ce même laboratoire, développèrent à partir de LOGO ce qu'ils appelèrent une « géométrie à tortue ». Ils se réclamaient eux aussi ouvertement de l'intuitionnisme constructiviste, en particulier en mathématiques[1]. Et ils proposaient de développer LOGO comme un outil d'aide à la production

[1] [Abelson, H., 1976], p. 160 : "All mathematics has (ultimately) intuitive foundations, but in turtle geometry the links are particularly close."

des concepts mathématiques pour les étudiants[1] mais aussi comme un support de conception de systèmes graphiques. Or, là était la nouveauté. Il s'agissait pour eux de relier l'IA constructiviste et les techniques de l'infographie. L'intérêt des commandes graphiques de LOGO en effet est qu'elles ne s'appuient pas sur un système de coordonnées global. Les propriétés géométriques sont « intrinsèques aux figures plutôt qu'imposées par une infrastructure de référence »[2]. La construction de formes est donc très facilement programmable de manière procédurale.

C'est en 1982 qu'Abelson et di Sessa font paraître leur ouvrage synthétique *Turtle geometry* aux presses du MIT. Prusinkiewicz en prend alors connaissance, en même temps que l'étude précédente de Szilard. Il s'inspire donc de ces deux sources. Et il a l'idée de relier cette approche souple avec les formalismes des L-systèmes pour concevoir un système de représentation graphique de formes botaniques complexes. En 1986, il publie un premier article sur « Les applications graphiques des L-systèmes ». Il propose d'interpréter systématiquement les règles de réécriture des L-systèmes comme commandant les mouvements d'une tortue dont il trouve le comportement tout à fait analogue à un méristème apical de plante. Il contacte ensuite Lindenmayer avec lequel il collabore quelque temps. Prusinkiewicz tente en fait de le convaincre que l'usage des L-systèmes pour l'infographie permet de rejoindre plus simplement ses propres préoccupations initiales en morphologie biologique, celles qui l'avaient conduit aux L-systèmes de 1968. Notamment l'usage de la tortue permet d'éviter le laborieux parenthésage linéaire que Lindenmayer avait d'abord proposé pour la représentation des ramifications. La station Silicon Graphics IRIS 3130 qu'il utilise à Regina présente l'avantage de spatialiser véritablement les L-systèmes et de les rendre plus accessible à l'intuition. Un peu comme Ulam en son temps face à von Neumann, Prusinkiewicz est le promoteur d'une spatialisation du formalisme que Lindenmayer voulait croire au début évitable ou contournable à grand renfort de linguistique structurale. Ce faisant, il contribue à faire entrer les L-systèmes dans une phase au cours de laquelle ils cesseront d'être des modèles purement théoriques.

En 1987, Prusinkiewicz et Lindenmayer font donc une communication ensemble à la première conférence sur la Vie Artificielle, organisée par Christopher Langton, à Santa Fe[3]. Prusinkiewicz y montre que l'approche constructiviste par le formalisme de la tortue possède un autre intérêt remarquable : celui de faire accéder les L-systèmes à la tridimensionnalité. On peut en effet considérer que la tortue fait subir des rotations de vecteurs dans l'espace pour changer sa direction au moyen de produits vectoriels[4]. Lors de cette conférence, ils présentent plusieurs images assez réalistes de plantes. Mais cette collaboration prend fin rapidement avec la mort de Lindenmayer en 1989.

Dans les années qui suivent, avec ses étudiants en informatique graphique de Regina, Prusinkiewicz conçoit ce qu'il appelle un « Laboratoire Virtuel » de botanique. Mais en réalité, son approche reste celle d'un informaticien : ce laboratoire virtuel qu'il veut être une aide décisive pour la botanique se révèle surtout être une grosse banque de données visuelles et hiérarchisées par catégories d'objets[5]. Il est conçu dans un esprit de programmation orientée-objets autour de son premier logiciel conçu en C à partir de 1986 : *Pfg* (pour *Plant and fractal generator*). Il a pour

---

[1] [Abelson, H., 1976], p. 162 : "Turtle geometry illustrates how computation can serve as a conceptual tool in exploring mathematics."

[2] [Abelson, H., 1976], p. 159 : "Descriptions of geometric figures in Logo tend therefore to be more procedural than descriptions arising with most other computer graphics implementations, and couched in terms of properties which are intrinsic to the figure in question rather than imposed by an external reference frame."

[3] Pour une histoire du programme de « Vie artificielle », voir [Goujon, P., 1994a] et [Goujon, P., 1994b].

[4] [Lindenmayer, A. et Prusinkiewicz, P., 1987], p. 228.

[5] Voir [Prusinkiewicz, P. et Lindenmayer, A. 1990, 1996], pp. 193-200.

fonction première de présenter des informations scientifiques de manière visuelle. Prusinkiewicz soutient bien qu'on y pourrait effectuer de « nouvelles expériences »[1]. Mais il pense en termes d'expériences pédagogiques : dans la lignée de l'approche de Piaget, Papert, Abelson et di Sessa, Prusinkiewicz considère qu'il y a continuité entre l'expérimentation scientifique porteuse d'informations réellement nouvelles et l'expérience d'apprentissage propre aux étudiants. À partir de 1991, il est nommé professeur d'informatique à l'Université de Calgary. C'est là qu'il poursuit le développement de sa plate-forme logicielle.

Dès ses premiers travaux, Prusinkiewicz est connu de l'équipe du CIRAD, notamment par le biais de Françon et de ses doctorants Jaeger et Blaise. De surcroît, le livre abondamment illustré *The algorithmic Beauty of Plants*, écrit en collaboration avec Lindenmayer juste avant sa mort, contribue à le faire connaître très tôt[2]. Mais Françon comme de Reffye considèrent qu'il n'y a pas là une réelle attention aux connaissances botaniques fines. Il s'agit encore d'une modélisation de haut en bas, donc assez théorique et valorisant le formel pour le formel. Ce laboratoire virtuel ne s'appuie pas sur des concepts botaniques suffisamment nombreux et généraux pour avoir les moyens de ses ambitions, c'est-à-dire pour posséder un caractère véritablement générique de manière à pouvoir se substituer à la réalité de terrain dans certaines expérimentations inédites. Confirmant ce diagnostic, son logiciel va d'ailleurs surtout se diffuser dans les milieux de l'informatique graphique. De son côté, Prusinkiewicz n'ignore pas les travaux de de Reffye. Mais il les trouve au départ un peu improvisés d'un point de vue formel même s'il sera conduit à changer d'avis par la suite, du fait de la convergence remarquable qui va avoir lieu entre AMAP et sa propre approche[3].

Pourtant cette convergence ne sera pas exactement le fait de Prusinkiewicz lui-même, même si plusieurs rencontres ont lieu à partir de 1995. Son épistémologie fondamentale le lui défend en quelque sorte. Ainsi écrit-il encore en 1997 :

*« Un des principaux buts de la science est de trouver des principes qui unifient des phénomènes apparemment divers. Avec ce large objectif à l'esprit, j'applique des notions et des méthodes de l'informatique pour gagner une meilleure compréhension de l'émergence des formes et des structures [*patterns*] dans la nature.* »[4]

C'est donc dans un esprit finalement assez proche de Rashevsky et de la biologie mathématique théorique que Prusinkiewicz pense qu'il faut chercher un formalisme unique en vue de comprendre. Avec lui, le mathématisme d'antan se conserve mais il se transforme en quelque sorte en un « informatisme » : il faut plaquer les catégories de l'informatique du haut vers le bas et voir ensuite si l'on explique quelque chose du monde réel par là. Il faut aller des formalismes aux lois de la nature, alors que pour de Reffye, c'est l'inverse : il faut mesurer et improviser au besoin les premières formulations de lois. Le raffinement formel vient après. Les formalismes plaqués *a priori* peuvent en effet toujours être tordus en un sens ou en un autre pour donner l'impression de coller à peu près aux lois[5]. Ce qui ne veut pas dire que pour de Reffye, il ne faille pas chercher le

[1] [Prusinkiewicz, P. et Lindenmayer, A. 1990, 1996], p. 193.
[2] [Prusinkiewicz, P. et Lindenmayer, A. 1990, 1996].
[3] [Prusinkiewicz, P., 2003], p. 2.
[4] Dans sa page personnelle, Prusinkiewicz s'exprime ainsi : "One of the main goals of science is to find principles that unify apparently diverse phenomena. With this broad objective in mind, I apply notions and methods of computer science to gain a better understanding of the emergence of forms and patterns in nature", CPSC Faculty Brochure, http://pages.cpsc.ucalgary.ca/~pwp/
[5] Voir notre entretien [Reffye (de), Ph. et Varenne, F., 2001], pp. 6 et 36-37. Ce que de Reffye appelle les « lois de la nature », ce sont par exemple ici les modèles architecturaux, la nature stochastique des comportements des méristèmes

meilleur formalisme. Mais cela ne peut se faire qu'à partir d'un modèle empirique intégrant les lois mesurées. D'ailleurs, on voit de Reffye évoluer quelque peu sur le statut épistémique de ses simulations par rapport à 1996 : elles doivent servir de terrain de tests empiriques pour des modèles mathématiques qui restent, en eux-mêmes, plus que jamais désirables.

Certes, au cours des années 1990, le laboratoire de Prusinkiewicz a tiré quelques enseignements d'AMAP et de ce que Prusinkiewicz appelle les modèles empiriques par opposition aux modèles causaux[1] : il assouplit le système logiciste et implémente des lois probabilistes dans les règles de ramification formelle. Toujours est-il que le besoin, voire la nécessité, de calibrer réellement ces modèles logicistes complexifiés ne viendra pas tout de suite d'un laboratoire d'informatique comme celui de Prusinkiewicz mais, d'une manière assez compréhensible, d'une Faculté de sciences forestières, celle de l'Université de Göttingen.

Une grammaire sensible à l'environnement : GROGRA –1994

En 1994 en effet, dans le cadre d'une recherche postdoctorale, le mathématicien et informaticien Winfried Kurth travaille, dans cette faculté, sur un programme de modélisation de « la dynamique de changement des écosystèmes forestiers »[2]. Pour son doctorat, Kurth a d'abord travaillé sur la modélisation des formes naturelles au moyen des grammaires formelles de type L-système. Il connaît donc parfaitement les derniers travaux de Prusinkiewicz. Mais lorsqu'il arrive à la faculté de Göttingen, l'enjeu est différent de celui que connaissent habituellement les informaticiens et les infographistes : il faut rendre ces modélisations enfin calibrables et utilisables pour des analyses en écologie forestière. Or, à l'époque, aux yeux des chercheurs de Göttingen, si l'on veut traiter la forêt comme un écosystème, il n'apparaît plus suffisant de développer des modèles de processus à compartiments et à budgets de matières. Car on occulte par là l'hétérogénéité de l'interception de la lumière et du climat radiatif. On néglige également les mécanismes complexes de flux de sève en rapport avec le comportement hydrique de l'arbre. Et on se condamne enfin à ne pouvoir suivre la dynamique des paramètres structuraux, dont les cernes, dans les troncs[3]. Comme leurs collègues sylviculteurs et agroforestiers auparavant, les chercheurs développant une approche d'écologie forestière éprouvent donc aussi, mais un peu plus tard, le besoin de passer à l'échelle de l'arbre individuel.

Au départ, Kurth s'intéresse à l'approche de l'AMAP à travers les travaux de Jean Dauzat sur la simulation du climat radiatif sous couvert végétal. C'est par là qu'il se convainc de procéder lui-même à la conception d'un modèle morphologique d'arbres individuels de manière à pouvoir ensuite les traiter en peuplement. Il est donc d'accord sur la nécessité de prendre en compte l'architecture. Là est la clé de la convergence à laquelle il prend part. À ce sujet, il se trouve un précurseur en écologie forestière même et qu'il cite souvent. C'est le biologiste et écologue des plantes britannique, Adrian D. Bell, de l'Ecole de Biologie Végétale du *University College of North Wales*. Bell était au départ un spécialiste des rhizomes. Entre 1972 et 1976, en partie lors de ses recherches postdoctorales au centre *Harvard Forest* du Massachusetts, il avait bénéficié du

---

en botanique, l'axe de référence et l'âge physiologique des méristèmes, la loi de l'efficience de l'eau en agronomie. Ce sont donc des lois phénoménologiques, à une échelle assez globale. Il les compare à la loi d'Ohm en électricité (U = RI) auxquels il faudrait, selon lui, un nouveau Maxwell pour leur retirer leur caractère purement phénoménologique et les déduire de modèles explicatifs. Voir *ibid.*, p. 40. Ces lois n'évolueront pas selon lui sur le fond mais seulement sur la forme, dans leur formalisme. Ce qui est d'ailleurs souhaitable. C'est pourquoi ce sont des lois de la *nature*.

[1] [Prusinkiewicz, P., 1998], p. 114.

[2] [Kurth, W., 1995], p. 12.

[3] [Kurth, W., 1995], p. 2.

matériel informatique du Centre de Calcul du MIT, à Amherst. Le fonctionnement régulier de certains rhizomes l'avait intrigué. Les angles des branches successives sont souvent des multiples de 60° et la figure générale du système rhizomatique peut donc ressembler à un pavage d'hexagones ouverts ou fermés. Cela l'avait d'abord amené à concevoir un système de représentation graphique simple, à la main, où les branches filles poussaient avec des probabilités calibrées en champ[1]. Mais la dynamique du rhizome avec ses naissances et ses morts ne pouvant être transcrite par ces signes graphiques simples, il avait ensuite songé à employer un système informatique susceptible de faire voir cette dynamique de croissance et de sénescence au cours du temps. Il s'était ainsi convaincu de l'utilité de conserver une représentation spatialisée et qu'il fallait pour cela recourir à l'ordinateur :

« Les résultats concernant les arrangements spatiaux doivent être présentés par l'ordinateur d'une manière visuelle au moyen d'un système d'affichage graphique plutôt qu'au moyen d'une chaîne de coordonnées, si la proximité entre les plantes doit être appréciée. »[2]

Bell nommera ce logiciel RHIZOM mais il le développera assez peu, car il travaillera par la suite de manière moins formalisée sur la morphologie des plantes à fleur. En tout cas, la volonté commune de spatialiser (Bell) et de prendre en compte l'architecture (de Reffye – Dauzat) est bien la clé de la convergence plus tardive entre modèle logiciste et simulation architecturale en écologie forestière. En 1994 donc, inspiré par Dauzat comme par Bell, Kurth développe son propre logiciel, baptisé GROGRA (pour GROwth GRAmmar), sur une station Silicon Graphics IRIX 5.2. Il y conserve l'approche des L-systèmes par les tortues de Prusinkiewicz. Mais il enrichit considérablement les règles de réécriture de manière à y intégrer plus substantiellement les lois botaniques mises en valeur auparavant par de Reffye et son équipe. Kurth rencontre pour cela plusieurs fois les chercheurs de l'AMAP. Et il reconnaît le tribut qu'il leur doit.

Or, afin de converger vers une plus grande fidélité botanique, Kurth est obligé de faire figurer pas moins de 26 règles de nature différentes dans ses L-systèmes (à comparer aux 3 règles initiales de Lindenmayer !). Le formalisme devenant de ce fait très intrinsèquement hétérogène, il n'est donc plus question de mettre en priorité l'accent sur des théorèmes qui pourraient *a priori* en être tirés, même si cette préoccupation, remontant à Lindenmayer, demeure encore chez Kurth[3]. L'idée majeure de Kurth réside toutefois dans cette manière de rendre dès le début sa grammaire de croissance sensible à l'environnement :

« Pour prendre soin des facteurs endogènes et exogènes comme la lumière du soleil, les stimuli mécaniques, la fourniture en nutriments et le statut de l'eau, une sorte de sensibilité est nécessaire. Les L-systèmes sensibles au contexte classiques[4] *se sont révélés insatisfaisants*

---

[1] Même si son système est plus simple du fait de la limitation de son objet d'étude, le rhizome, on constate donc qu'aux mêmes dates que de Reffye, Bell propose une solution de simulation stochastique très similaire. Dans l'article de 1976, Bell se félicite d'avoir pu utiliser autre chose que des *plotters*, à savoir un des premiers écrans graphiques du MIT ; ce qui lui a permis de simuler, de manière dynamique et sur la même image, la disparition par pourriture des parties du rhizome tombées en sénescence. Voir [Bell, A. D., 1976], p. 5. On le sait, ce n'est pas avant 1989 que de Reffye a pu bénéficié d'une telle technologie graphique, soit 13 ans plus tard.

[2] [Bell, A. D., 1976], p. 5 : "Results concerning spatial arrangements must be presented by the computer in a visual manner as a graphic display, rather than as a string of coordinates, if the proximity of the plants is to be appreciated."

[3] Comme Prusinkiewicz, du point de vue de l'informaticien qu'il est originellement, il considère qu'il faut privilégier la recherche de formalismes concis et proches de l'explication plutôt que de la description. Voir sa page de présentation datant de 2003 du *Plant Modelling Group* de Göttingen, accessible à l'adresse http:///www.uni-forst.gwdg.de/~wkurth/pro_wk.html.

[4] Ils ne sont sensibles qu'à l'état de la cellule précédente ou suivante. Notre remarque.

parce qu'il existe des interactions non-locales entre des parties de plantes (par exemple l'ombrage) qui influencent la croissance. À cette fin, une sensibilité globale a été introduite, c'est-à-dire que certaines règles conditionnelles peuvent avoir accès au contexte géométrique complet de la structure qui vient d'être engendrée. »[1]

La générativité purement locale des L-systèmes avait beaucoup fait pour leur succès dans un contexte logiciste et mécaniste en biologie du développement (Lindenmayer et Lück) puis constructiviste en infographie (Abelson, di Sessa et Prusinkiewicz). Mais dans un contexte de modélisation écologique, afin de prendre en compte les boucles de régulation du global sur le local, Kurth se voit contraint de tempérer ce mécanicisme fondateur dans sa propre approche de la morphogenèse. Certaines branches entières peuvent porter ombrage à des organes appartenant à d'autres branches situées en dessous, par exemple. Pour prendre en compte cet effet qu'on peut dire écologique à l'intérieur même de la plante[2], dans le programme, une représentation de l'architecture globale de l'arbre tant topologique que géométrique doit pouvoir constamment être appelée par les règles formelles de croissance. Avec ces complexifications informatiques, il est vrai grandement facilitées par la programmation orientée-objet, Kurth parvient à calibrer précisément GROGRA sur un épicéa de 14 ans en prenant des mesures similaires à celles d'AMAP.

Cette convergence vers l'architecture se laisse percevoir également dans des travaux de modélisation forestière mis en œuvre à partir de 1996 par une équipe de l'Institut finnois de Recherche Forestière, à Helsinki. Inspirée par AMAP, mais surtout par Kurth, l'équipe de Jari Perttunen choisit de se dispenser de tout formalisme logiciste ou mathématique *a priori* et écrit directement un programme orienté-objet en C++. Elle le baptise LIGNUM parce qu'il a lui aussi comme objectif de prendre en compte le fonctionnement et pas seulement l'architecture. Le modèle est purement informatique. Il considère un arbre comme « une collection d'unités simples correspondant aux organes »[3]. Suivant l'approche imposée par C++, l'arbre est conçu comme une collection de listes d'unités de base, listes dans lesquelles les unités peuvent s'appeler par des pointeurs. C'est seulement au niveau des attributs des unités de base que la morphologie, la géométrie, le budget en carbone, etc., sont implémentés. Les unités de base ne sont que de trois types : segments d'arbres, points de ramification et bourgeons. Ainsi que les auteurs le précisent, cette simplification est possible parce que le modèle n'est pas conçu pour représenter tout type de plantes, contrairement à AMAP[4]. LIGNUM est en fait d'abord conçu et calibré sur des pins sylvestres. Mais le formalisme purement informatique autorise une complexification ultérieure. Ce qu'espèrent en tout cas les auteurs.

Mais en 1998, un événement va contribuer à faire cristalliser tous ces débuts de convergences et qui placera encore AMAP en position d'avant-garde. Un article synthétique de 46 pages co-signé par le mathématicien Godin et le botaniste Caraglio, tout deux d'AMAP, paraît

---

[1] "To take care of endogenous and exogenous factors like sunlight, mechanical stimuli, nutrient supply or water status, some kind of sensitivity is necessary. Classical context sensitive L-systems turned out to be unsatisfactory because there exist non-local interactions between plant parts (e. g. overshadowing) influencing growth. To this purpose, global sensitivity was introduced, i. e. conditional rules can have access to the complete geometrical context of the structure just generated", [Kurth, W., 1995], p. 5.

[2] Comme AMAP, Kurth se réclame d'ailleurs de l'article fondateur de James White (1979) : « The Plant as a Metapopulation ».

[3] "…a collection of a large number of simple units which corresponds to the organs of the tree", [Perttunen, J., Sievänen, R., Nikinmaa, E., Salminen, H., Saarenmaa, H. et Väkeva, J., 1996], p. 87.

[4] [Perttunen, J., Sievänen, R., Nikinmaa, E., Salminen, H., Saarenmaa, H. et Väkeva, J., 1996], p. 96.

dans le *Journal of Theoretical Biology*[1]. Après un rappel de Caraglio sur les réquisits de la botanique, Godin y présente de façon exhaustive, systématique et quasi-axiomatique son concept de « modèle multi-niveaux » mis en œuvre dans AMAPmod depuis 1996. L'axiomatique des graphes manifeste une souplesse inédite. Laissant de côté la simulation mais tirant profit des distinctions acquises par AMAP dans ses simulations antérieures, elle se présente comme un nouveau type de modélisation formelle, de langage mais aussi d'analyse de la structure des plantes. Des opérateurs de projection peuvent être définis entre différentes échelles de considération, à l'intérieur de la plante. L'hypothèse centrale, très contraignante, que se donne Godin est que le modèle multi-niveaux a une structure récursive. C'est-à-dire que la structure du modèle ne dépend pas de l'échelle à laquelle on décrit la plante, même si à différentes échelles certains attributs différents sont manifestés. Cela a pour effet d'imposer une contrainte de cohérence sur le modèle[2]. Mais c'est ce qui le rapproche d'un modèle mathématique sans le ramener pour autant à une simple règle d'auto-similarité géométrique de type fractale. Certains théorèmes sont démontrables. L'emphase mise sur l'axiomatique des graphes vient certes de l'impulsion initial d'Eric Elguero mais aussi et surtout de la formation initiale et du travail de thèse de Godin : analyse de la parole par différents modèles stochastiques, dont des chaînes de Markov[3].

Entre-temps, face à cet article décisif, l'argument classique de « l'unicité du formalisme pour comprendre » se mue chez Kurth en un argument « d'unicité du formalisme pour *combiner* différents modèles » à travers les L-systèmes[4]. Il s'aperçoit que ses propres L-systèmes, comme le « modèle multi-niveaux » de Godin, ne représentent plus les phénomènes dans leurs mécanismes mais qu'ils servent à structurer formellement un dialogue entre des modèles (topologiques, probabilistes, géométriques…) de manière à les combiner de façon tout à la fois constructive et réaliste. Or c'est là rejoindre, par le haut et par dégradation du formalisme logiciste initial, l'épistémologie développée par ailleurs et sur le terrain par AMAP.

En 2002, cette convergence va plus loin encore. Elle est matérialisée par un travail d'interfaçage informatique effectué par Kurth lui-même et une de ses étudiantes, Helge Dzierzon. Il s'agit pour eux d'abandonner pendant quelque temps GROGRA pour interfacer LIGNUM et AMAPmod. Ce qui se révèle donc dans cet article, c'est qu'AMAPmod tend à devenir un standard de représentation formelle de la plante dans le monde de la modélisation architecturale. Comme dans l'histoire antérieure de l'informatique et des logiciels, arrive ce temps où la compatibilité est nécessaire pour que le dialogue se poursuive et que, comme l'écrivent Dzierzon et Kurth, « l'intersubjectivité réduise le biais de notre perception de la réalité écologique »[5]. Le modèle informatique incarne donc ici l'intersubjectivité. Il la matérialise. C'est en ce sens qu'il passe pour un double de l'objet réel dans sa complexité même. Selon Dzierzon et Kurth, c'est devant le

[1] [Godin, C. et Caraglio, Y., 1998].
[2] [Godin, C. et Caraglio, Y., 1998], p. 37.
[3] Dans sa thèse de 1990 intitulé « Proposition d'une cadre algorithmique unifié pour la compréhension de la parole continue», Godin proposait en effet déjà une « architecture intégrée » de modèles de manière à permettre une communication intensive des différents modèles habituels de reconnaissance de la parole à différents niveaux. Sous la direction de Bernard Dubuisson (UTC), il avait travaillé à produire des principes algorithmiques susceptibles d'établir des ponts entre les techniques numériques de bas-niveau et les techniques de reconnaissance symbolique de haut-niveau. Le but de cette unification était déjà de chercher une manière d'optimiser les systèmes intégrés dans le cas de la reconnaissance de la parole.
[4] Ce glissement est très net dans ses dernières publications. Il cherche à interfacer de nombreux autres modèles de façon à pouvoir les comparer sur des bases objectives, c'est-à-dire quantifiables. Voir [Kurth, W., 2002] et [Dzierzon, H. et Kurth, W., 2002].
[5] "Thus an improved intersubjectivity to reduce the bias in our perception of ecological reality is the aim", [Dzierzon, H. et Kurth, W., 2002], p. 46.

logiciel commun, porteur d'une formalisation commune, que l'on pourra continuer à discuter de la réalité écologique. Cependant, une structure de modèle même généralisée reste une simplification pour les auteurs. L'interfaçage a surtout pour rôle de dévoiler les hypothèses cachées dans chaque modèle : les modèles peuvent être comparés objectivement et se critiquer en un sens de manière objective, puisque de façon déléguée à la machine. Pour Kurth, qui n'abandonne pas ainsi son projet de trouver le meilleur formalisme, la machine devient certes un terrain commun. Mais c'est un terrain de *confrontation* entre modèles en vue d'une sélection du plus apte, alors que pour d'autres, comme Dauzat, elle reste un terrain de *coexistence* entre modèles en vue de simulations empiriques. Avec ses interfaçages, Kurth cherche à rendre le modèle séparable du logiciel de manière à fonder la généricité du modèle[1]. Cette généricité est elle-même désirée pour pouvoir *comprendre* et discuter ce qui se passe dans le modèle, indépendamment de son implémentation informatique.

Aux mêmes époques, l'INRA lui-même, après de longues années d'hésitation, finit par converger spontanément, et de l'intérieur, vers les techniques de simulation architecturale. Ainsi, d'autres approches concurrentes et en même temps voisines de celle de l'AMAP vont voir le jour à la fin des années 1990, notamment dans le milieu des écophysiologistes.

Simuler la plante individuelle pour voir fonctionner les cultures (1997-2000)

Précédemment en effet, nous avions vu que l'écophysiologiste du PIAF, Pierre Cruiziat, s'était intéressé, plus que d'autres, à l'approche architecturale et centrée sur la plante individuelle telle qu'elle était proposée par l'AMAP. Il tâchera de la faire adopter, de son côté et à sa manière, par son laboratoire. Mais il n'est pas tout à fait le seul, à l'INRA. À partir de 1995, c'est sous la direction de son collègue de l'Unité de Bioclimatologie de l'INRA de Grignon, Bruno Andrieu, que Christian Fournier commence une thèse sur la « modélisation des interactions entre plantes au sein des peuplements »[2]. L'idée initiale de ce travail est que la pratique des cultures, et plus seulement la foresterie, a besoin de traiter la plante au niveau individuel. Car, s'il faut aller vers une agriculture plus respectueuse de l'environnement, cela suppose que l'on accepte d'avoir affaire là aussi à des systèmes plus complexes[3].

D'autre part, Andrieu avait auparavant travaillé sur des systèmes de mesure à distance de la réflectance des cultures en vue de relier ces valeurs à la production. Il avait éprouvé rapidement les limites de cette approche analytique et globale[4] : dans le cas des cultures de plantes herbacées, on ignore les propriétés directionnelles des feuilles. Il est donc impossible de remonter d'un signal de réflectance global mesuré par des capteurs situés à distance (*remote sensing*) à une structure précise de culture : on ne peut inverser le signal mesuré. Entre-temps, il avait eu connaissance des travaux que Dauzat proposait en ce sens dès 1991. Avec Fournier, Andrieu décide donc de passer lui aussi à une phase de synthèse et de simulation architecturales de la plante pour l'appliquer au cas du fonctionnement des cultures.

Dans la thèse de Fournier, en particulier, c'est la structure en croissance du maïs qui est simulée. Il est à noter qu'Andrieu et Fournier préfèrent employer pour cela les formalismes des L-systèmes du *Virtual Laboratory* tels qu'ils ont été entre-temps rendus plus perméables aux

[1] [Kurth, W., 2002], p. 99.
[2] Voir [Fournier, C., 2000], p. 1.
[3] [Fournier, C., 2000], p. 1. Cet argument provient aussi du fait que la thèse est financée par le programme « Développement de procédés agricoles sobres et propres » de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME).
[4] Voir [Andrieu, B., 1997], pp. 22-26.

différents caractères morphologiques par certains élèves de Prusinkiewicz. Le fait de disposer d'un L-système sous la forme accessible d'un langage de programmation en facilite en effet l'implémentation. De plus, la complexité de la ramification n'est pas telle, dans le cas du maïs, qu'il faille recourir aux modèles de simulation les plus riches et les plus généraux d'AMAP. Fournier utilise donc un L-système paramétrique où les règles de production contrôlent la mise en place et l'évolution parallèle d'un ensemble de modules. Ces modules incorporent des caractéristiques géométriques et topologiques. Ils peuvent se remplacer ou croître et co-évoluer. Comme Prusinkiewicz le fera à partir de 1996, Andrieu doit cependant écrire, en collaboration avec un programmeur de l'INRA, une interface informatique spécifique pour prendre en compte les effets de l'architecture globale sur les règles qui gardent sinon des conditions purement locales de déclenchement. Fournier et Andrieu sont en effet placés devant le même problème que Kurth, en écologie forestière. Pourtant, ils décident de ne pas reprendre le L-système, trop complexe, de Kurth. Moyennant cette adjonction *ad hoc*, Fournier parvient à faire simuler de manière visuellement réaliste la morphogenèse d'un plant de maïs en prenant en compte des modèles phénoménologiques de comportement de l'apex (rythmé dans ses initiations de feuilles par une « loi de réponse à la température »[1]) et de croissance de la feuille (modèle mathématique phénoménologique d'allongement au cours du temps). Les sous-modèles qu'ils agrègent sont donc fortement phénoménologiques. Ils sont très peu assis sur des connaissances botaniques ou physiologiques précises[2].

On voit donc que le fondement du travail de Fournier et Andrieu est leur reprise de l'idée de la multi-modélisation[3] ou multi-formalisation pour l'appliquer au cas des cultures. Comme pour AMAP, c'est l'infrastructure informatique des L-systèmes, avec leur traitement pas à pas du phénomène complexe de morphogenèse, qui le leur permet. En écophysiologie des cultures aussi, il y a donc bien une convergence de certains travaux vers la philosophie qu'AMAP préconise, pour sa part, depuis le milieu des années 1980.

L'association avec l'INRIA en Chine : sous-structures et contrôle optimal (1998-2003)

Pourtant, cette évolution vers une convergence forte, logicielle, quasi technologique donc, n'est pas la seule qui anime la modélisation architecturale à la fin des années 1990. De Reffye ne participe déjà plus directement à cette convergence dont on a vu qu'elle s'effectue essentiellement

[1] Cette loi est accessible dans la littérature écophysiologique depuis 1983 : voir [Fournier, C., 1997], p. 205.

[2] De Reffye prétend ainsi que ses propres sous-modèles reflètent tous en revanche d'authentiques caractéristiques élémentaires des plantes, quelque chose comme des « lois de la nature ». En ce sens, il voit une grosse différence entre le travail de l'équipe d'Andrieu et la sienne. Pourtant cette notion de « loi de la nature » est sans doute très discutable : à quelle échelle doit-on la prendre ? On a vu qu'il en était hanté dès le moment où, en 1974, il décida que les probabilités de floraison du caféier étaient des « caractères génétiques » à part entière. Les lois phénoménologiques et locales (au niveau d'un organe) de l'écophysiologie sont-elles pourtant si différentes de nature que celles de la ramification aléatoire du méristème ? On le voit : la problématique (et l'angoisse corrélative) du déracinement est de nouveau reprise à cette échelle plus fine. De Reffye n'est pas du tout un partisan du fictionnalisme dans le modélisme, on l'aura finalement compris.

[3] Le terme de « multi-modélisation » a été introduit en 1989 par l'informaticien canadien (d'origine turque) Tuncer Ibrahim Ören dans un contexte de réflexion sur les paradigmes de simulation informatique à destination des systèmes essentiellement technologiques et industriels. Il s'agissait de désigner par là une infrastructure de simulation capable de combiner différents types de modélisation dont, au départ, des modélisations avec équations différentielles et des modélisations discrètes. Il a été repris et élaboré, aux cotés de la notion de « multi-formalisme » à partir de 1991 et 1993 par des spécialistes en simulation comme Herbert Praehofer puis Bernard P. Zeigler. Voir [Zeigler, B. P., Praehofer, H. et Gon Kim, T., 1976, 2000], pp. 227-229. Depuis lors, ce concept s'est appliqué plus largement en écologie et en sociologie où la simulation individus-centrée s'était déjà développée à partir de la fin des années 1980. Sur la multi-modélisation en écologie, voir [Duboz, R., 2004], p. 16-17. Sur la simulation individus-centrée en général, voir [Ferber, J., 1995, 1997], en écologie, voir [Grimm, V., 1999] et [Amblard, F., 2003].

au niveau logiciel et formel. Car, de son côté, entre 1998 et 2002, et sur la lancée d'AMAPhydro, il cherche à développer son propre retour aux mathématiques *via* la théorie du contrôle. Une opportunité va lui être donnée rapidement. En 1996, lors de la revue externe, un chercheur de l'INRIA, Olivier Monga, avait fait partie des rapporteurs, aux côtés d'Alain Pavé notamment. Il avait été favorablement impressionné par le travail d'AMAP. Et il était resté en contact avec de Reffye depuis lors. Ce dernier l'avait même choisi comme conseiller scientifique permanent. Or, le 27 janvier 1997, suite à un accord avec l'Académie des Sciences chinoise, l'INRIA crée le LIAMA, le Laboratoire franco-chinois d'Informatique, d'Automatique et de Mathématiques Appliquées. Et Olivier Monga en est le premier co-directeur français.

Le LIAMA est abrité par l'Institut d'Automatique de Pékin. C'est une structure de coopération à long terme favorisant la réalisation de projets ciblés[1]. Monga propose donc à de Reffye de venir le rejoindre à Pékin. Il y a une communauté d'intérêts puisque de Reffye cherche aussi à développer une plate-forme logicielle AMAP plus performante. Début 1998, ce dernier se fait donc détacher par le CIRAD auprès de l'INRIA et, d'abord accompagné de Frédéric Blaise, il rejoint Monga au LIAMA pour développer le projet « Modélisation stochastique, fonctionnelle et interactive de la croissance des plantes par ordinateur ». Leurs interlocuteurs sur place sont des spécialistes en automatique mais aussi des agronomes de l'Université d'Agronomie de Chine. De Reffye juge leur approche plus pragmatique et moins prévenue au sujet de la modélisation et de la simulation. Il jouit donc bien de cette liberté à laquelle il aspirait en quittant son poste de directeur. En trois ans, il est amené à encadrer huit doctorants. Le résultat majeur sera la découverte d'un moyen de simplifier la représentation formelle de la plante à partir des simulations stochastiques. L'intérêt de cette simplification est qu'elle permet d'accélérer considérablement la vitesse de calcul.

Mais lorsque de Reffye arrive en Chine, l'objectif prioritaire affiché n'est pas nécessairement celui-là. Il est de mieux intégrer le fonctionnement écophysiologique dans le modèle stochastique et architectural. Dans un premier temps, de Reffye se souvient que le principe fondateur d'AMAP consiste à faire confiance au programme de simulation stochastique pour le laisser interpoler entre les situations qui ont été réellement relevées sur les arbres de terrain. Or, en travaillant avec les automaticiens de l'INRIA et de l'Institut d'Automatique chinois, il se convainc que c'est dans cette interpolation que l'on perd une maîtrise sur ce que fait le programme. La simulation y remplace la modélisation et c'est là que les calculs les plus nombreux et les plus coûteux en temps doivent être faits. L'équipe du LIAMA essaie donc de systématiser l'habitude qu'avait de Reffye de chercher des cas qui soient calculables à la main ou au moins à l'aide de formules mathématiques. On s'en souvient : cette pratique avait initialement pour but de vérifier la simulation. Ce faisant, de manière assez inattendue, l'équipe parvient à montrer que près de 90% des cas d'arbres simulés peuvent en fait être calculés de cette façon, mathématique, et donc économe en calculs. De Reffye et ses étudiants, dont Xin Zhao et Hong-Pin Yan, découvrent que cela vient du fait que les méristèmes finissent souvent par ne générer qu'un petit nombre de sous-structures typiques pour engendrer l'arbre entier. Certains arbres simulés peuvent contenir jusqu'à 600 fois la même sous-structure. L'« axe de référence » de 1991 est donc abandonné dans le nouveau logiciel baptisé pour l'occasion GreenLab. Et, en 2001, Xin Zhao et de Reffye, d'abord inspirés par l'approche par emboîtements de Godin mais l'ayant modifiée en fonction de ces observations faites à la fois sur le

[1] Cette structure de recherche de type « Laboratoire mixte » international n'est pas une nouveauté. C'est un axe important de la politique du CNRS depuis les années 1960. En ce qui concerne l'INRIA, créé en 1967 dans le cadre de la mise en œuvre du « Plan Calcul », le but plus particulier est de parvenir à des débouchés industriels. L'article 2 du décret 85-831 du 2 août 1985 rappelle en outre qu'une des missions de l'INRIA est « d'organiser des échanges scientifiques internationaux ».

fonctionnement des simulations stochastiques comme sur la hiérarchie réelle des unités architecturales botaniques, proposent la notion de « modèle d'automate à échelle duale » [« *dual-scale automaton model* »]. C'est un automate à deux niveaux, un automate d'automates en quelque sorte. À l'intérieur d'un macro-état, des micro-états peuvent transiter les uns vers les autres avec des lois de probabilités fixées.

Dans cette reprise de la hiérarchisation morphologique, la notion d'âge physiologique est mise au premier plan. Car les sous-structures sont considérées comme équivalentes et ne nécessitent pas d'autres calculs si elles ont le même âge physiologique. Cela signifie qu'elles possèdent le même ensemble de paramètres cachés. De Reffye propose que l'on distingue 4 niveaux ou échelles : le niveau du métamère (composé d'un entre-nœud, de ses feuilles axillaires, de ses fruits et bourgeons), le niveau de l'unité de croissance (ensemble des métamères qui apparaissent lors du même cycle de croissance), le niveau de l'axe porteur et le niveau de la « sous-structure » proprement dite, à savoir la branche pour les plantes qui en possèdent[1].

Pour construire un arbre simulé, il ne devient plus nécessaire de s'appuyer d'emblée sur l'échelle des métamères. Une forme de sous-structure est calculée une fois pour toutes. Et lorsque l'automate commande sa réitération avec une certaine probabilité, le programme n'a plus qu'à rappeler en mémoire le contenu des paramètres topologiques et géométriques déjà calculés pour faire afficher de nouveau cette sous-structure[2]. Presqu'aucun nouveau calcul n'est alors nécessaire. À titre de comparaison, un cerisier de 20 ans est calculé en 2 minutes par AMAPsim et en moins d'une seconde avec GreenLab. Dans ce cas précis, la simulation architecturale est donc à peu près 200 fois plus rapide[3]. Ce nouveau modèle informatique a certes toujours recours à de la simulation de type Monte-Carlo mais d'une façon beaucoup plus restreinte qu'auparavant. Quant au couplage avec l'écophysiologie pour en faire un modèle structurel-fonctionnel, ce qui était l'objectif principal, GreenLab reprend pour l'essentiel les concepts et les équations d'AMAPhydro en considérant la production de biomasse, feuille par feuille, en fonction de l'architecture[4]. Pour finir sur ce point, il est important de noter que GreenLab fonctionne désormais sur un simple PC doté du logiciel de calcul formel Matlab[5]. Ainsi, à la faveur des progrès technologiques intervenus entre-temps dans l'industrie de la micro-informatique, AMAP peut enfin abandonner le recours systématique aux stations graphiques dédiées et très coûteuses.

Le modèle structurel-fonctionnel est ensuite calibré rapidement sur des plantes, d'abord sans branches, comme le tournesol, le cotonnier et le maïs[6]. La collaboration de l'Université d'Agronomie de Chine est là très précieuse : c'est elle qui s'est chargée de fournir les données expérimentales nécessaires au calibrage[7]. La technique de calibration est facilitée grâce aux simplifications formelles dues à l'étape AMAhydro et au développement de l'automate à échelle duale. C'est un des effets immédiats de la re-mathématisation du modèle d'AMAP : des procédures de *fitting* statistiques relativement classiques comme les moindres carrés généralisés

---

[1] [Reffye (de), Ph., Goursat, M., Quadrat, J.-P. et Hu B. G., 2003], p. 109.

[2] La probabilité de la sous-structure peut être construite à partir de la simulation stochastique intégrale. Ainsi on peut comparer empiriquement la variabilité simulée par AMAPsim et la variabilité simulée par le modèle mixte à sous-structures stochastiques. Voir [Kang, M. Z., Reffye (de), Ph., Barczi, J.-F. et Hu, B. G., 2003], p. 5 : les deux différents types d'images produites sont indiscernables à l'œil, dans le réalisme de leur variabilité.

[3] [Kang, M. Z., Reffye (de), Ph., Barczi, J.-F. et Hu, B. G., 2003], p. 4.

[4] [Yan, H. P., Reffye (de), Ph., Le Roux, J., Hu, B. G., 2003], pp. 118-122.

[5] Doté d'un processeur Intel Pentium 4 fonctionnant à 1700Mhz et avec une mémoire système de 256Mo. Voir [Kang, M. Z., Reffye (de), Ph., Barczi, J.-F. et Hu, B. G., 2003], p. 4.

[6] [Zhan, Z., Reffye (de), Ph., Houllier, F. et Hu, B. G., 2003], p. 236.

[7] Précisons que lors de l'AIP INRA/AMAP de 1993, ce sont les chercheurs du CIRAD qui avaient été obligés de faire eux-mêmes les mesures de terrain pour des travaux qui étaient parfois à destination des seuls chercheurs de l'INRA…

peuvent enfin être directement appliquées pour identifier de manière économique les paramètres[1]. L'utilisation courante en agronomie de GreenLab paraît donc envisageable.

Un autre effet majeur de cette re-mathématisation commence à se dessiner après 2001. Elle a été mise en œuvre avec de Reffye, à l'INRIA de Rocquencourt, où il est détaché depuis son retour en France en 2002. C'est la possibilité de déterminer *a priori* des itinéraires culturaux optimaux en utilisant les techniques calculatoires du contrôle optimal issues de l'automatique. Dans le cadre du projet METALAU[2], avec l'aide de Maurice Goursat et de Jean-Pierre Quadrat, de l'INRIA, Boa-Gang Hu et Philippe de Reffye ont dernièrement explicité les équations dynamiques du modèle GreenLab. Ce sont essentiellement des équations de récurrence. Le formalisme des automates peut être traduit en termes d'équations matricielles à retard[3]. Or, Quadrat et surtout Goursat ont participé à la conception du logiciel Scilab de résolution numérique de problèmes d'optimisation en sciences. Cette plate-forme, développée en partenariat avec l'Ecole des Ponts et Chaussés depuis 1990, est un logiciel libre depuis 1994[4]. Les auteurs prévoient en fait d'intégrer GreenLab dans Scilab. Ce projet justifie en fait *a posteriori* et publiquement le recours préalable au suffixe « Lab ».

Ce retour aux équations permet donc de « dé-spatialiser » quelque peu le formalisme de la morphogenèse pour lui faire retrouver la linéarité linguistique de l'équation algébrique. Cette équation elle-même, si elle ne peut être inversée afin de donner directement les valeurs optimales pour une production végétale donnée, peut tout au moins être manipulée par des techniques numériques d'optimisation assez classiques. Et la plante s'apparenterait ainsi à terme à un système dynamique artificiel dont l'optimalité serait *a priori* contrôlable puisque connaissable.

---

[1] [Zhan, Z., Reffye (de), Ph., Houllier, F. et Hu, B. G., 2003], p. 241.

[2] METhode, Algorithmes et Logiciels pour l'AUtomatique. Projet dirigé par Maurice Goursat, Directeur de Recherche à l'INRIA. Il a pris la suite de Jean-Pierre Quadrat, Directeur de Recherche à l'INRIA, ancien directeur d'un projet similaire intitulé META2 de 1987 à 1999. Tous les deux sont spécialistes en méthodes d'optimisation, notamment au moyen d'approches stochastiques.

[3] [Reffye (de), Ph., Goursat, M., Quadrat, J.-P. et Hu, B. G., 2003], p. 109-111.

[4] Voir le site http://www.scilab.org.

CONCLUSION : Convergences autour de la simulation pluriformalisée

Entre-temps, la convergence institutionnelle s'accélère vivement. Le 1er janvier 1999, à expiration de la convention d'association signée en 1995, et sous l'impulsion de la politique de Claude Allègre, AMAP est devenue une Unité Mixte de Recherche INRA/CIRAD. À partir de 1998, en effet, ce qui était parfois encore regardé comme un excroissance coûteuse dans le cadre de la politique scientifique du CIRAD devient au contraire une vitrine pour la restructuration de la recherche française. Cette restructuration est conçue par le ministère autour de « pôles de compétences », au-delà des frontières entre institutions de recherche et d'enseignement[1]. La méthodologie, les concepts et les technologies logicielles d'AMAP sont également enseignés plus largement et systématiquement. Tous les chercheurs sont mis à contribution.

Le 1er janvier 2001, toujours sous la direction de François Houllier, la convergence se poursuit : AMAP devient une UMR CIRAD/INRA/CNRS/Montpellier II. Elle prend le nom de «UMR Botanique et bioinformatique de l'architecture des plantes ». Le terme « bioinformatique » est arraché de haute lutte, notamment par François Houllier, au monopole de la génomique et de la protéomique. En janvier 2003, Houllier est nommé chef du département « Ecologie des forêts, prairies et milieux aquatiques » (EFPA) de l'INRA. Et c'est Daniel Barthélémy qui devient directeur de l'UMR AMAP 5120. Ce même 1er janvier 2003, cette UMR se voit encore associée à l'EPHE (Ecole Pratique des Hautes Etudes), à l'INRIA et à l'IRD[2].

Ainsi, l'époque des convergences mérite bien son nom. Après une période de dissémination des propositions formalisées de modélisation mathématique puis de simulation spéculative sur ordinateur, les années 1970 ont vu la naissance des premières convergences des simulations avec l'empirie. Cette première série de convergences était limitée. Chez les biologistes et botanistes, elle entrait dans le cadre de préoccupations encore principalement théoriques. Et la modélisation mathématique pragmatique, dont la source était la biométrie anglaise et son épistémologie afférente, ne pouvait se sentir inquiétée par de tels développements. Il en a été autrement à partir du moment où cette convergence de la simulation avec l'empirie a été un besoin dans une problématique agronomique et de terrain. Dans ce contexte, la simulation est tout de suite entrée en dialogue étroit avec la modélisation statistique pragmatique et mono-formalisée. Dans l'histoire que nous avons rapportée, on voit que l'ordinateur, pensé très tôt chez certains comme support de simulations réalistes, détaillées et pluriformalisées, a pu se battre pied à pied avec ce type plus classique de modélisation pour remporter enfin une victoire, peut-être éphémère mais bien réelle, jusque dans la modélisation explicative de la morphogenèse.

---

[1] Voir le rapport d'activité du CIRAD de 1998, *in* [CIRAD, 1999], p. 9 : « Le CIRAD redéfinit sa stratégie d'alliance » [Titre du chapitre]. Plus loin, on lit « Le CIRAD s'est donc résolument engagé dans une campagne de contractualisation au sein d'unités mixtes de recherche avec les université et les écoles d'enseignement agronomique. » À l'époque, Guy Paillotin est Président du Conseil d'administration. Alain Pavé est Président du Conseil scientifique. Bernard Bachelier est Directeur général. Et Alain Coléno est représentant du ministre de l'éducation nationale, de la recherche et de la technologie au sein du Conseil d'administration.

[2] UMR 5120 du CNRS, UMR 931 de l'INRA et R 123 de l'IRD. Selon le site de l'Université de Montpellier II, ses objectifs en 2003 sont désormais d'« Évaluer la variabilité de l'architecture des plantes dans une perspective de sélection ou d'amélioration génétique. Comprendre, modéliser et simuler le fonctionnement intégré des plantes et des peuplements végétaux afin de prédire leur production en quantité et en qualité. Représenter les paysages et leur évolution dans une perspective d'aménagement et de gestion des espaces ruraux et urbains. Développement des logiciels de simulation de la croissance des arbres et des peuplements. » Ce site est accessible à l'adresse suivante : http://www.montpellier123.com/pages/fiche-complete.php?num=98. En octobre 2003, l'UMR compte 43 agents permanents.

Commença alors la période des trois convergences ou conciliations disciplinaires : avec l'informatique graphique, avec la foresterie, avec l'automatique. Cette série de convergences alla de pair avec une simplification formelle, du point de vue de la généralité mathématique des modèles supports des simulations. Cette simplification conduisit à une concrétisation et à une standardisation de l'outil logiciel, comme à l'amplification de son caractère opérationnel. Or, cette re-mathématisation n'aurait sans doute pas été possible si la dispersion des modèles n'avait auparavant été exorcisée ou neutralisée par le pluriformalisme natif des modèles de simulation de l'architecture. Comme conséquence de cela, et malgré de fortes résistances, on a vu que l'épistémologie des scientifiques elle-même a dû se réformer dans l'urgence, afin de permettre de penser ce qui était devenu bien réel et qui fonctionnait sous leurs yeux. Certains travaux timides voient même déjà au-delà, aujourd'hui, et proposent ce que nous pourrions appeler la quatrième convergence : celle de la simulation architecturale et morphogénétique avec la génétique et la biologie moléculaire[1]. Mais il nous faudra attendre encore pour dire si l'espoir de cette convergence est prématuré ou non.

Parallèlement à ce développement de la simulation architecturale, des propositions de modélisation physicaliste continuèrent à se développer un peu partout dans le monde et à rechercher parfois la calibration, mais sur des espèces de plantes particulières. En fait, elles en restèrent encore massivement à une approche théorique et spéculative. C'est pourquoi nous n'en avons pas suivi le détail sur les deux dernières décennies : elles n'ont fait que contextualiser de loin les avancées propres de la simulation architecturale opérationnelle, sans renouveler fondamentalement l'esprit des approches monoformalisées de notre deuxième période : celle des dispersions. Elles en restèrent essentiellement à ce moment-là de l'histoire des modèles[2]. Elles n'ont pas convergé les unes vers les autres ni vers des usages spécifiques. Ainsi en est-il par exemple des travaux de biomécanique du botaniste et mathématicien, en poste au Département de Biologie Végétale de l'Université Cornell (New York), Karl J. Niklas. Dans une double perspective d'ingénierie en mécanique et de biologie évolutionnaire, Niklas utilise l'ordinateur pour complexifier l'approche classique de Murray, Rashevsky et Cohn. Il propose d'employer les équations de la mécanique des fluides pour rendre temporel à l'échelle de la phylogénie un principe d'optimalité physico-physiologique au regard de ce qu'il appelle les « performances » de la plante. Niklas et ses collègues ont ainsi été amenés à produire un programme simulant, au cours du temps, la sélection naturelle des performances physico-physiologiques d'un grand nombre de plantes dont les formes avaient d'abord été tirées au hasard[3]. Ils cherchent à voir émerger les formes les plus performantes du point de vue de leur allométrie.

L'insistance sur le caractère évolutionnaire de la morphologie d'une plante, mais à une autre échelle, est également le fait de deux chercheurs israéliens : Tsvi Sachs et Ariel Novoplansky (Département de Botanique de l'Université de Jérusalem). Selon eux, les « modèles architecturaux

---

[1] Ainsi en est-il des travaux sur les QTL (*Quantitative Trait Loci*). Ce sont des *loci* de gènes qui codent pour des traits quantitatifs, donc en particulier pour des tailles de caractères morphologiques. En 2000, des chercheurs allemands de l'Institut de Génétique des Plantes de Gatersleben ont fait simuler à l'ordinateur la morphologie finale d'un épi d'orge en lien avec des génotypes connus faisant intervenir des QTL. Il ne s'agit de la simulation que d'une partie d'une plante herbacée, mais déjà « les interactions entre gènes et entre allèles sont calculées en utilisant les connaissances fournies par les études génétiques expérimentales et permettent la prédiction des valeurs de variables morphologiques », [Buck-Sorlin, G. H. et Bachmann, K., 2000], p. 691. Ces prédictions se font par interpolation. Les auteurs utilisent le formalisme du « laboratoire virtuel » de Prusinkiewicz. Ils s'appuient sur un L-système paramétrique semblable à celui de Fournier et Andrieu.

[2] Les différents articles de la publication collective de [Fleury, V. et Bouligand, Y., 2004] en témoignent encore.

[3] Voir [Niklas, K. J., 1986] et [Niklas, K. J., 2000].

ne suffisent pas »[1] à exprimer l'architecture d'une plante. Ils ne se reconnaissent donc pas dans l'approche de Hallé et Oldeman qu'ils trouvent réductrice. En effet, pendant la croissance de la plante dont ils rappellent qu'elle appartient à un groupe évolutionnaire tardif, des détails imprévisibles apparaissent. Ces détails sont contraints par la mécanique intervenant au cours de la croissance comme par des différenciations progressives elles-mêmes fonctions de la distance de l'apex aux racines : la plante reste un organisme évolutionnaire à l'échelle même de l'ontogénie. Les auteurs arguent alors du fait que les mécanismes qui sont responsables du changement graduel du mode de développement des branches ne sont pas connus[2] : on aurait donc tort de les modéliser par un modèle déterministe et de se croire satisfait à bon compte. En fait, en 1995, en invoquant le défaut de scénario explicatif dans les travaux de leurs collègues, Sachs et Novoplansky visent surtout l'école de Prusinkiewicz[3] dans la mesure même où elle n'a pas encore intégré à l'époque les aléas ni les rétroactions du global sur le local dans ses modèles, comme le fera Kurth par la suite, tirant en cela les leçons de l'AMAP. De plus, ils rendent compte du niveau davantage biochimique et mécanique de leurs travaux sur la morphogenèse. En 2004, en effet, Sachs et ses collègues montreront le rôle de l'auxine dans la formation des feuilles, en lien avec un modèle local d'auto-organisation.

Pendant les décennies 1980 et 1990, de nouveaux modèles purement physicalistes ont aussi régulièrement vu le jour à proportion même des avancées de la physico-chimie. Ainsi en est-il du modèle analogique d'Agrégation Limitée par la Diffusion (*DLA*) des physiciens spécialistes en physique statistique loin de l'équilibre que sont T. A. Witten et L. Sander (Université du Michigan - 1981). Ce modèle est né dans le cadre d'études des phénomènes de cristallogenèse et de percolation[4]. Il est simulable aisément sur ordinateur et mène à une croissance fractale. Il s'agit de faire venir, par une marche aléatoire, une particule qui diffuse sur un agrégat déjà constitué et de la faire s'agréger dès qu'elle rentre en contact avec cet agrégat. On obtient ainsi la croissance d'une forme ramifiée dont la nature purement aléatoire et déstructurée ne permet bien sûr aucun rapprochement précis avec la croissance des plantes. En fait, la plante ne croît pas par agrégation de particules venant de l'environnement aérien extérieur, mais par croissance interne et assimilation préalable de nutriments. Les botanistes ne retiennent donc pas ce modèle.

Par ailleurs, à partir de 1991, S. Douady et Y. Couder, du Laboratoire de Physique Statistique de l'ENS-ULM (rue Lhomond), présentent une expérience d'auto-organisation de gouttes de ferrofluide sous l'effet d'un champ magnétique : à partir d'une petite surélévation dans l'huile qui les reçoit, ces gouttes, lâchées périodiquement à partir d'une pipette, diffusent vers le lieu où se trouve le minimum d'énergie eu égard à leur polarisation, en tant que dipôles, et eu égard au champ magnétique global. Ainsi, la nouvelle goutte se fixe à une distance de la goutte précédente telle que les divergences irrationnelles classiques de la phyllotaxie (série de Fibonacci) sont ainsi reproduites[5]. La simulation numérique conjointe aboutit au même résultat. C'est une nouvelle occasion pour Roger V. Jean de déclarer qu'il n'y a pas besoin d'imaginer que les *patterns* de la phyllotaxie sont commandés par les gènes et qu'il suffit de les rapporter à des lois physiques[6]. Mais il est encore obligé de reconnaître la variété immense des approches explicatives de cette petite partie de la morphogenèse qu'est la phyllotaxie.

---

[1] Voir [Sachs, T. et Novoplansky, A., 1995].
[2] [Sachs, T. et Novoplansky, A., 1995], p. 209.
[3] À l'époque, ils ne connaissent pas l'approche d'AMAP et notamment les travaux de Frédéric Blaise.
[4] Voir [Fleury, V., 1998], pp. 107-125, [Stewart, I., 1989, 1997, 1998], pp. 319-321
[5] Voir [Jean, R. V., 1994, 1995], pp. 262-265.
[6] [Jean, R. V., 1994, 1995], p. 264.

Aucun de ces modèles monoformalisés n'a encore véritablement rejoint le terrain de l'empirie dans sa précision, comme dans sa généralité et sa diversité. Les différents substrats analogiques du physicalisme se sont tout au plus diversifiés, sans que le spectacle d'une dispersion entre ces approches parcellaires, et souvent purement suggestives d'un point de vue théorique, ne cesse, bien au contraire. Toutefois, par rapport aux publications grand public, cycliques et de même genre, du milieu des années 1990, dans la publication récente *Les formes de la vie*[1], la rupture entre l'approche par modèles mathématiques et l'approche par simulation pluriformalisée, même si elle n'est pas consciemment assumée ni expliquée ou revendiquée, est latente : alors que certains auteurs en restent encore au vieux rêve de d'Arcy Thompson, d'autres, souvent plus jeunes, en appellent à une « voie holistique »[2], qui n'est finalement qu'une forme particulière de simulation reconstructrice, pluriformalisée, historiciste et réaliste, servant à résoudre le problème essentiel, et cette fois-ci explicitement reconnu, du caractère non monoformalisable des objets complexes en croissance[3]. Mais malgré ces frémissements de convergence dans les approches classiquement théorico-physicalistes, aujourd'hui encore, la simulation informatique de la plante intégrale, conçue à partir des réelles connaissances de la science descriptive qu'est la botanique, paraît pouvoir conserver son avance quelque temps dans le domaine des transferts de méthodes formelles sur le terrain. Davantage : la recherche de modèles mathématiques effectuée à partir de simulations architecturales fidèles, ayant la pleine valeur d'un terrain d'expérimentations virtuelles, et non plus à partir des habituelles suggestions physicalistes venues directement de la chimie ou de la physique, s'y épanouit et y prend un sens désormais indéniable. En fait, comme on l'a vu, une telle entreprise de simulation architecturale, doublée d'une modélisation sur simulation, demande beaucoup de travail de terrain, sans que le rapport entre l'expérience réelle et le formalisme y demeure pour autant dialectique : c'est qu'il y entre un troisième terme, celui de la simulation. Une telle modélisation n'est pas non plus comparable à une mathématisation purement positiviste, c'est-à-dire directe, arbitraire et indifférenciée. N'étant une formalisation ni dialectique, ni positiviste, la méthode qu'elle introduit est une manière assez inédite de modéliser et d'expérimenter.

---

[1] Numéro hors-série de *Pour la science*, n°44, juillet-septembre 2004 : [Fleury, V. et Bouligand, Y., 2004].

[2] [Fleury, V. et Bouligand, Y., 2004], p. 87.

[3] Voir l'aveu récent du physicien de la matière condensée, Vincent Fleury lui-même, *in* [Fleury, V. et Bouligand, Y., 2004], p. 3 : « De tels systèmes dépassent un seuil de complexité ('algorithmique') qui n'est pas réductible, et ils ne sont pas mathématisables individuellement : l'information est trop dispersée dans l'espace et dans le temps de sa construction […] On ne peut décrire aucune arborescence particulière, mais on peut engendrer une arborescence de la même famille, par simulation numérique, sans qu'il soit possible de rentrer dans la 'pensée' de l'ordinateur : l'apparition de cette arborisation par simulation n'est pas formalisable. » Voici donc ce versant classique (physicaliste) de la biologie théorique qui, lui aussi enfin, semble converger vers cet outil de convergence, par excellence, qu'est la simulation *informatique* (et non numérique). Actuellement (2004), en travaillant avec des collègues biologistes, Vincent Fleury apprend en effet à fragmenter et à pluriformaliser ses modèles, pour en faire un traitement par simulation. Ainsi en est-il des simulations de ce qu'il appelle significativement le « façonnage » des vaisseaux sanguins, *ibid.*, p. 113. A cette même page, on retrouve même un style qui fait un troublant écho aux propos de de Reffye de 1976 : « Pour obtenir l'image des vaisseaux, nous devons suivre 'le film' complet de la 'croissance' qui consiste en un remplacement de proche en proche d'un petit tuyau par un gros : à chaque étape, on recalcule toutes les modifications de l'écoulement. »

CONCLUSION GENERALE

La modélisation de la forme des plantes au 20ème siècle présente une histoire particulièrement complexe. Elle est pour le moins un des reflets de son siècle. C'en est un reflet modeste en extension, il est vrai, mais assez clair et riche cependant en compréhension. Ainsi, autour de cet objet d'étude finalement assez étroit et aux côtés de l'histoire de l'agronomie, de l'amélioration génétique des plantes, de l'embryologie, de la botanique ou de la dynamique des populations, on rencontre aussi l'histoire de la décolonisation ou de la fédération progressive des recherches agronomiques pour le développement en France, comme on rencontre aussi l'histoire des mathématiques, de la statistique, de la recherche opérationnelle, de l'informatique, de la philosophie ou de la linguistique. Ces rencontres multiples risquaient d'ajouter à la confusion. Elles ont bien eu lieu pourtant comme l'attestent les documents. Et nous aurions été coupable de ne pas essayer d'en rendre compte. Avec cette enquête, nous pensons avoir montré qu'il ne fallait pas trop tenter de réduire cette multiplicité dès lors que l'on veut rapporter et comprendre une histoire de la modélisation.

En fait, nous avons cru pouvoir reconnaître de grandes tendances dans chacune des époques que nous avons isolées : successivement un déracinement puis une dispersion et enfin une convergence. En ce qui concerne la période qui nous a occupé, un des résultats principaux de cette étude, et qui intéresse en priorité notre problématique générale, est que c'est bien *l'émergence de l'ordinateur*, d'abord dans ce qui l'a précédé théoriquement et mathématiquement et ensuite dans les solutions techniques qu'il a proposées, qui a été en grande partie le moteur et le promoteur de cette scansion comme de cette évolution. Si le déracinement des formalismes est certes antérieur à l'ordinateur, c'est pourtant un contexte logiciste et néo-positiviste, initiateur privilégié du déracinement des formalismes au tournant du 19ème et du 20ème siècles, qui a vu naître ces automates à computation. Ce qui a préparé comme ce qui a suivi l'apparition de

l'ordinateur a donc interagi avec cet étonnement voire avec cet émerveillement en revanche assez atemporel et assez uniformément répandu chez les hommes, qu'ils soient de science ou non, pour la genèse de la forme des plantes. Ainsi peut s'expliquer en partie le fait que ce soit finalement des mathématiciens, devenus entre-temps informaticiens, qui aient les premiers proposé des simulations de la morphogenèse végétale.

C'est que, par là, des formalismes nouveaux étaient à disposition. Ou plutôt, des réplications de « formes » déjà géométriquement complètes, remarquablement simples et occupant un espace prédéfini (triangles, carrés), pouvaient nouvellement devenir des « formalismes » de par la force computationnelle inédite des machines numériques programmables. Une certaine re-spatialisation des formalismes est devenue possible. De la forme a pu y être réinjectée à partir du moment précis où la computation est devenue automatique et où les règles locales de réitération ont pu être prises en compte sans plus nécessiter de *condensation formelle* sous la forme d'équations ou de modèles mathématiques au sens strict. Les formalismes se spatialisant, les formes spatiales ont pu être formalisées de manière plus souple. De leur côté, les langages informatiques étant de moins en moins copiés sur les formulations analytiques des mathématiques traditionnelles (car ne devant plus exclusivement servir à des problématiques de calcul numérique) sont devenus algorithmiques, puis orientés-objets, pour le plus grand bénéfice des simulations réalistes. Mais ce n'était pas encore suffisant. Car on n'obtenait par là que des simulations très vaguement ressemblantes et pas du tout calibrables. L'hétérogénéité ni la systématicité apparente des formes végétales n'étaient encore susceptibles d'être appréhendées par le calculateur numérique. D'abord inspirées par l'essor du paradigme de la computation en physique et en logique, les simulations de la morphogenèse restèrent donc des spéculations pendant près de 20 ans avant que l'idée et la technique de la pluriformalisation et de la modélisation fractionnée ne naisse dans un contexte agronomique français. Car il ne faut pas oublier que de Reffye n'est pas passé à la simulation architecturale parce qu'il disposait d'un système graphique plus performant qu'Ulam. C'était même plutôt le contraire ! À presque quinze ans d'intervalle, la station agronomique de Bingerville est loin de disposer des techniques informatiques du Los Alamos de 1959. C'est en fait par la suite, c'est après avoir décidé de *fractionner* sa représentation mathématique pour la recombiner informatiquement de manière à la rendre intégrale et fidèle que de Reffye a voulu rendre graphiques ces simulations. Alors seulement, il le fit au moyen d'une simple table-traçante du commerce à faibles performances.

De Reffye a donc finalement bénéficié d'une certaine absence de prévention : très vite, et cela au contraire de ses confrères davantage prévenus épistémologiquement, il a décidé de ne pas rechercher à toutes forces une représentation monoformalisée de la plante, même de manière probabiliste ou informationnelle. Il a aussi été porté par sa foi constante, un peu décalée pour son temps, en l'existence de « lois de la nature » dont il acceptait pourtant par avance la difficile intelligibilité formelle. De par le contexte et les problématiques de terrain auxquels il était confronté, ce n'était ni un triomphalisme mathématiste ou systémiste, alors courant en biologie théorique, ni une épistémologie physicaliste qui le motivaient avant tout, mais la simple applicabilité des modèles qu'il concevait. C'est cela qui, au bout du compte, l'a amené à quitter la biométrie, mais aussi la simple simulation numérique suggestive et à visée théorique, pour faire entrer l'étude et la modélisation de la morphogenèse des plantes dans l'ère de la simulation informatique.

En retraçant l'histoire des tentatives plus ou moins avortées de formalisation de la plante, du début du 20ème siècle jusqu'à l'orée du 21ème siècle, nous avons abouti à la mise en évidence de deux faits de type d'abord historique. Le premier est le développement progressif et irrépressible de la simulation par ordinateur, en un domaine où l'on tâche de représenter un objet par nature

complexe. En près de 70 ans, alors que pour d'autres objets biologiques, les modèles mathématiques suffisaient et la simulation de représentation ne semblait pas nécessaire, dans le cas de la forme des plantes, l'évolution du statut épistémique des mathématiques et de l'ordinateur se poursuivait sans relâche. Ainsi y est-on d'abord passé de la théorie au modèle mathématique, puis du modèle mathématique à la simulation informatique. Le récit de cette émergence de la simulation informatique de la plante a lui-même conduit à suggérer un second fait historique qu'il faudrait confirmer par d'autres études plus larges sur l'histoire de la modélisation. Nous voulons parler de la triple naissance de la méthode des modèles en biologie et dans les sciences du vivant et de l'environnement : dans ses versants successivement statistiques (années 1920), cybernétiques (années 1950) et théoriques (années 1960 : bien que l'on puisse rétrospectivement, mais avec un regard déformant aux yeux de l'histoire, situer bien plus tôt la naissance de la modélisation en biologie théorique). Notre histoire, axée sur un objet d'étude précis, a constitué en effet une sorte de coupe longitudinale instructive dans l'histoire plus générale de la modélisation. Mais, si le caractère multiple de cette naissance apparaît bien au regard de l'évolution du traitement formel de la forme et de la croissance des plantes, elle ne nous permet pas de conclure encore à sa généralité.

D'un point de vue différent, plus épistémologique celui-ci, on voit se dessiner un autre résultat majeur de notre étude. C'est le fait que se confirme, pour le cas de la plante tout au moins, l'existence d'une troisième voie d'étude, ou source de connaissance, aux côtés de la théorie et de l'expérience, à travers les récentes techniques de simulation réaliste. Des expérimentations d'arboricultures et de sylvicultures virtuelles (effet de la verse, de la coupe, de l'élagage, des éclaircies sur la pousse) sont d'ores et déjà opérationnelles et utilisées. En 2003, avec l'intégration du fonctionnement dans les modèles de structure (toujours à la faveur de l'implémentation informatique et de son potentiel de convergence), les « expérimentations agronomiques virtuelles » annoncées en 1995 sont en passe de devenir réalité. L'ordinateur semble pouvoir devenir un « laboratoire virtuel », même si l'annonce de cet avènement avait été un peu trop précipitée par l'équipe de Prusinkiewicz. C'est en tout cas déjà le cas depuis le début des années 1990 pour ces urbanistes et ces paysagistes qui se servent quotidiennement de la technologie d'AMAP. Si l'on désire une analyse conceptuelle plus fine des raisons pour lesquelles on peut tenir cette simulation informatique pour une expérience concrète du second genre, nous nous permettons de renvoyer à nos articles sur cette question[1]. En deux mots ici, on peut tout de même rappeler que la pluriformalisation gérée informatiquement a pour effet de rendre purement computationnel le résultat de simulation. En ce sens, le produit d'une simulation possède la singularité d'un calcul en droit non prédictible autrement. C'est cette singularité, non encore conceptualisable ni monoformalisable (à l'heure où on la propose), du produit de la simulation, qui en fait le caractère empirique. Par là, on voit que, intégrés dans les programmes multiformalisés, les mathématiques et les formalismes servent aujourd'hui à autre chose qu'à condenser. Les simulations sur ordinateur s'émancipent des modèles mathématiques. Elles n'en sont plus une dépendance ou une dérivation. Car il n'est plus besoin de disposer d'un modèle mathématique préalable pour effectuer des simulations. Les simulations ne sont plus des annexes de la modélisation mathématique. Elles ne sont plus secondes du point de vue de leur rôle épistémique. Elles ne servent plus systématiquement au titre de calculs particuliers d'un modèle, le modèle initial étant censé conserver une richesse virtuelle plus haute (au sens du « virtuel » mathématique du second Granger). Elles sont autre chose. Aujourd'hui, ce sont parfois des simulations que l'on

[1] En particulier [Varenne, F., 2003a] et [Varenne, F., 2004a].

cherche à modéliser et non des modèles que l'on cherche à simuler. Les modèles sont à la fin et non au début de l'entreprise de représentation formalisée sur ordinateur. La traditionnelle dialectique théorie/expérience est de ce fait bousculée. Il faut y faire entrer la simulation entendue comme terrain virtuel d'expérimentation à part entière, puis ensuite comme terrain de test et de calibrage de modèles mathématiques condensants[1].

Pourtant, nous avons eu aussi l'occasion de comprendre les limites de cette dernière approche de la simulation et de la formalisation : elle est loin de pouvoir passer pour une solution miracle et indépassable. Même si ces modèles de simulations singulières sont calibrés, ils ne donnent pas les moyens de comprendre les phénomènes sous-jacents puisqu'ils en assument (ou postulent) le fractionnement. Surtout, ils ne permettent pas de pratiquer des optimisations autrement que par tâtonnements. Dans la période dans laquelle nous entrons, il semble que la tendance soit à la re-mathématisation des simulations de manière à ce que la plante, dès lors qu'on dispose de sa représentation fidèle, soit traitée à la même enseigne que les systèmes physiques ou les systèmes artificiels dont on sait mieux déterminer *a priori* les points de fonctionnement optimaux pour des contraintes données. Ce qui achèverait de faire de *la plante un produit direct de la conception humaine*, cela certes après des millénaires d'hybridation et de sélection, et après des décennies d'amélioration génétique. Il est important de noter que, d'un point de vue méthodologique et épistémologique, cela ne disqualifie pas pour autant le moment de la simulation singulière dont nous parlions précédemment car c'est seulement à partir de simulations de ce genre que des modèles mathématiques condensants et optimisables ont pu être conçus et testés. Il semble qu'AMAP n'aurait pu passer directement à ce stade sans s'aider de la construction préalable de simulations architecturales reposant sur des modèles mathématiques fractionnés.

Signalons que nous n'avons pas pour autant raconté une simple *success story* où il n'y aurait qu'un seul gagnant à la fin. L'histoire que nous avons rapportée montre au contraire que les résistances et les oppositions, se métamorphosant et renaissant à chaque époque, si elles peuvent paraître aller contre le vent de l'histoire, ont, pour certaines, été retrouvées par la suite et ont ainsi considérablement aidé à la série des synthèses et des convergences récentes. Les spéculations de jadis peuvent être amenées à revivre d'un jour à l'autre, notamment avec la métamorphose d'un outil de calcul en outil de simulation. Il y a là une certaine dialectique comme une ironie dans l'histoire des sciences, de par cet effet de récurrence des formalismes. Ainsi, la tentative insolite de Woodger est oubliée pendant près de trente ans avant d'être reprise par Lindenmayer et enfin par Prusinkiewicz, puis Kurth, pour s'adapter récemment à la finesse des traits botaniques. Autre exemple : les modèles probabilistes longtemps hégémoniques en biométrie tendaient à représenter et à analyser le devenir moyen de toute la plante ; ils ont été recyclés pour l'expression et la synthèse de quelques lois locales dans la plante. Des formalismes qui étaient conçus dans des esprits différents, portés par des motivations opposées, se voient ainsi rendus mutuellement compatibles par des infrastructures de programmation à objets. Ce qui a réussi à de Reffye et à ses collègues, c'est donc une forme d'opportunisme rare, dont ils ont fait d'ailleurs consciemment leur *credo*. Il faut le reconnaître : cet opportunisme a été grandement facilité par leur appartenance au CIRAD qui, de par sa vocation et sa mission d'EPIC, tend structurellement à favoriser des échanges pragmatiques entre de très diverses disciplines en vue du règlement commun et à moyen/court terme de problèmes concrets. La réussite de l'AMAP est

[1] Voir notre proposition d'une « triade épistémologique » dans les dernières pages de [Varenne, F., 2004a].

donc aussi la réussite de l'interdisciplinarité à laquelle prêtent les contrats et actions sur projets ciblés.

À cet égard, il est instructif de noter que l'école de modélisation française n'a pas su négocier très tôt ce tournant de la simulation. Elle n'y a même pas immédiatement participé. La principale raison de cette réticence est le long règne de l'épistémologie du modèle minimal et pragmatique. Avec la filiation Prenant, Teissier, Legay, nous avons rendu compte d'un des lieux d'origine principaux de cette épistémologie en France. Toutefois, l'approche plus nettement « indisciplinée » de Legay et de ses élèves a imposé l'acceptation de la dispersion des formalismes, comme la nécessaire interdisciplinarité intervenant dans toute modélisation. En cela, davantage que la biologie théorique mono-formalisée, elle était relativement prête à accepter et à interagir avec cette entreprise d'intériorisation et d'intégration de la diversité des formalismes en quoi consiste la simulation architecturale.

Pour une histoire plus spécifique de la philosophie des modèles en France et de ses liens avec l'histoire de la modélisation formelle, nous renvoyons à l'annexe B dans laquelle nous proposons quelques jalons et un début d'interprétation unitaire. Il est tout à fait saisissant, là aussi, de voir des conjonctions étroites entre l'histoire de la modélisation et l'épistémologie du temps. Nous sommes une fois de plus face à un authentique « esprit du temps ». À nos yeux, l'émergence de la simulation informatique a eu pour vertu de bousculer les cadres de la pensée épistémologique, tant des philosophes que des scientifiques, et de les faire ressortir dans leur contingence même et leur historicité. C'est pourquoi nous n'avons pu les utiliser pour servir à l'écriture d'une hypothétique « épistémologie historique » de la modélisation. La simulation elle-même, certes, n'échappera pas à son historicité. Mais elle nous aura au moins permis de juger et peut-être d'amender la philosophie des sciences contemporaine. Ainsi, le concept de « style » aurait été bien insuffisant pour dire toute la richesse de cette histoire des formalismes, de leurs usages de leurs motivations. Woodger et Rashevsky utilisent pendant un temps le même « style ». Ils n'ont pourtant pas du tout la même ontologie ni la même épistémologie. Or, cette différence, comme on l'a vu, aura des conséquences décisives sur la suite de l'histoire des sciences. On ne peut donc écrire une histoire de la modélisation en écrivant une histoire des « styles » de formalismes. Voilà ce dont notre étude nous a convaincu, en particulier.

Dans l'histoire de la modélisation appliquée aux sciences non-exactes et donc difficilement formalisables, il semble que l'histoire des mathématiques se mêle étroitement avec l'histoire des instruments et des pratiques, aussi bien qu'avec l'histoire des philosophies et des épistémologies. L'émergence d'un nouveau formalisme est d'ailleurs souvent l'occasion de voir naître un nouveau mathématisme comme une nouvelle ontologie. La naissance des techniques informatiques et de la théorie des automates n'y a pas échappé. Ainsi a-t-on vu parfois une sorte d'« informatisme » vouloir supplanter l'antique mathématisme. Mais ce que l'histoire des formalismes au 20ème siècle donne en particulier à voir, c'est cette dextérité nouvelle dans le passage incessant du physicalisme au mathématisme et inversement. Inspirée par la physique théorique, la biologie théorique entrant en résistance nous offre même l'exemple d'une vaste et progressive entreprise de subtilisation de son physicalisme originel vers un mathématisme polymorphe. Le mathématisme présente en effet l'immense avantage de protéger contre toute accusation de réductionnisme, comme il protège de l'accusation de croyance naïve en un enracinement des formalismes dans les choses.

Ce que nous apprend de surcroît l'étude précise du travail de formalisation de Woodger en embryologie, puis de Lindenmayer, en regard de celui de Rashevsky, c'est l'existence, peu soupçonnée par les historiens jusqu'à présent, d'un véritable « *tournant linguistique* » à motivation

philosophique à l'intérieur de l'histoire de la modélisation contemporaine. Ce tournant linguistique dans les sciences de la nature entretient des rapports étroits avec celui de la philosophie, juste antérieur de deux décennies environ. Pour l'intelligibilité de notre siècle, le fait d'avoir mis en lumière ce point de concordance nous paraît décisif. Alors que Rashevsky resta toujours juste en-deçà de ce choix tout en s'abreuvant aux sources de la topologie la plus contemporaine, Woodger a été le premier à importer des considérations logicistes à l'intérieur de la biologie théorique. Il l'a fait prématurément, pourrait-on dire, au regard de l'histoire. Chez lui, le formalisme était traité comme le produit d'une axiomatique munie de ses règles syntaxiques. Il ouvrait ainsi la voie à la discrétisation des formalismes quinze ans avant le premier usage de l'ordinateur pour la morphogenèse, dans lequel celui-ci servira pourtant encore au calcul approché d'un modèle continuiste. Il ouvrait aussi la voie à la conjonction future entre les formalismes de modélisation de Lindenmayer et les théories des langages formels de la linguistique structurale comme de l'informatique théorique. Accessoirement, il ouvrait enfin la voie à la bio-informatique moléculaire de Walter R. Stahl, c'est-à-dire à ce qui allait devenir cette « bio-informatique » actuellement hégémonique, héritière en cela des 50 ans d'hégémonie de la biologie moléculaire.

Pour finir, avec la confirmation de cette tendance à la convergence, notre problématique pourrait prendre désormais un sens légèrement différent : de façon plus générale cette fois-ci, le destin contemporain des formalismes dans les sciences non-exactes passe-t-il, a-t-il passé, ou peut-être même va-t-il passer, par une semblable scansion ? Autrement dit, ce que nous avons décelé pour la biologie, avec la plante, et pour la science de l'environnement plus largement, avec l'écologie forestière, est-il un phénomène général ? *A priori*, cela se pourrait fort bien, du fait que l'outil informatique est fortement non spécifique à un domaine de la science. Et c'est bien lui qui a joué le rôle clé dans les convergences que nous avons rapportées. De surcroît, la modélisation s'est étendue à tous les grands champs de la science, dont celui des sciences humaines. Pour contribuer à une étude de l'histoire de la modélisation contemporaine, il nous faudrait donc poursuivre notre enquête et tester une semblable hypothèse de convergence sur un ou plusieurs secteurs des sciences humaines. Alors seulement, une plus grande généralité pourrait être donnée à notre constat : l'ordinateur contribuerait à une redistribution des disciplines, à une refondation de leurs rapports et à une mixité des modèles comme à une intégration des approches. Sans nous consoler définitivement de cette perte du réel due aux grands tournants linguistiques de notre siècle comme à leurs déracinements corrélatifs, il contribuerait ainsi peut-être à la co-construction d'un sens commun du second genre encore à penser par la philosophie et l'épistémologie.

BIBLIOGRAPHIE THEMATIQUE

Avertissement :

Nous présentons notre bibliographie en deux versions : thématique puis purement alphabétique. Si la référence comporte plusieurs dates, la première date correspond à la première édition, la dernière à celle de l'édition que nous avons utilisée. S'il y a des dates intermédiaires, il s'agit de celles des premières traductions ou des réimpressions. Les dix entretiens que nous avons menés ont été transcrits et figurent dans le thème « Entretiens oraux », dans la version thématique, et au nom de la personnalité interviewée, suivi du nôtre, dans la version alphabétique. Ils sont déposés aux archives du Musée des Arts et Métiers.

A – SOURCES PRIMAIRES

I- Sur la biologie, plus particulièrement sur la modélisation en biologie et en écologie:

Ouvrages généraux

[Apter, M. J., 1966], Cybernetics and Development, Oxford, Pergamon Press, 1966, 188p.

[Aristote, DA, 1993], De l'âme, traduction, présentation et notes de Richard Bodéüs, Paris, Garnier-Flammarion, 1993, 293p.

[Atlan, H., 1972], L'organisation biologique et la théorie de l'information, Paris, Hermann, 1ère édition 1972, nouvelle édition augmentée 1992, 300p.

[Atlan, H., 1999], La fin du « tout génétique » ? Vers de nouveaux paradigmes en biologie, Paris, INRA-éditions, 1999, 91p.

[Auger, P., Baudry, J., Fournier, F., 1992], Hiérarchies et échelles en écologie, publication d'un rapport proposé au SCOPE (Scientific Committee on Problems of the Environment) pour la Conférence de Rio de juin 1992), Paris, Naturalia Publications, 1992, 283 p.

[Beetschen, J. C., 1984], La génétique du développement, Paris, PUF, QSJ, 1984, 128p.

[Bertalanffy (von), L., 1968, 1973], General System Theory, New York, Georg Braziller ; traduction : Théorie générale des systèmes, Paris, Bordas, 1973, 298p.

[Binder, E., 1967], La génétique des populations, Paris, PUF, QSJ, 1967, 128p.

[Bouché, M., 1990], Ecologie opérationnelle assistée par ordinateur, préface de F. di Castri. Paris, Masson, 1990, 344p.

[Boulaine, J., 1971], L'agrologie, Paris, PUF, QSJ, 1971, 128p.

[Bristol, 1959], Models and Analogues in Biology, Proc. of the Symposium of the Society for Experimental Biology held at Bristol, n°XIV, Cambridge University Press, 1960, 255p.

[Chauvet, G., 1995], La vie dans la matière – Le rôle de l'espace en biologie, Paris, Champs-Flammarion, 1995, 292p.

[Cherruault, Y., 1983], Biomathématiques, Paris, PUF, « Que sais-je ? », 1983, 128p.

[Cherruault, Y., 1998], Modèles et méthodes mathématiques pour les sciences du vivant, Paris, PUF, 1998, 299p.

[Coquillard, P. et Hill, D. R. C., 1997], Modélisations et simulations d'écosystèmes, Paris, Masson, 1997.

[Corner, E. J. H., 1964, 1970], La vie des plantes, édition américaine : 1964, sans lieu ; traduction complétée par l'index de Paule Corsin : Paris, Stock, coll. « La grande encyclopédie de la nature », 1970, 383p.

[Danchin, A., 1998], La barque de Delphes, Paris, Editions Odile Jacob, 1998, 396p.

[Danchin, A., 2003], « Biologie théorique », texte de présentation des travaux d'Antoine Danchin par lui-même, accessible sur le site http://www.pasteur.fr/recherche/unites/REG/AD/Antoine_Danchin.html.

[David, P. et Samadi, S., 2000], La théorie de l'évolution – Une logique pour la biologie, Paris, Champs-Flammarion Université, 2000, 312p.

[Dawkins, R., 1976, 1989, 1996, 2003], The selfish gene, Oxford University Press, 1976 ; seconde édition : 1989 ; traduction : Le gène égoïste, Paris, Odile Jacob, 1996 ; réimpression : Odile Jacob – Poches, 2003, 459p.

[Diehl, R., 1964, 1965], La sélection végétale, Paris, PUF, QSJ, 1ère édition : 1964 ; 2ème édition : 1965, 126p.

[Duboz, R., 2004], Intégration de modèles hétérogènes pour la modélisation et la simulation de systèmes complexes – Application à la modélisation multi-échelles en écologie marine, Thèse d'informatique, Université du Littoral, 2004, 207p.

[Franc, A. *et al*., 2000], Une introduction à la modélisation des forêts hétérogènes, Franc, A., Gourlet-Fleury, S. et Picard, N., Nancy, ENGREF, 2000, 312p.

[Goudot-Perrot, A., 1967], Cybernétique et biologie, Paris, PUF, QSJ, 1967, 126p.

[Gorenflot, R., 1998], Biologie végétale - Plantes supérieurs : appareil végétatif, Paris, Masson, 1ère édition : 1977, 2ème édition : 1998, 286p.

[Gros, F., Jacob, F. et Royer, P., 1979], Sciences de la vie et société, Rapport présenté à M. le Président de la République en 1978, Paris, La Documentation Française - Seuil, 1979, 288p.

[Hallé, F., 1999], Eloge de la plante. Pour une nouvelle biologie, Paris, Seuil, 1999, 341p.

[Heinmets, F., 1969], Concepts and Models of Biomathematics : Simulation Techniques and Methods, vol. 1, ed. by F. Heinmets, New York, Marcel Dekker, Inc., 1969, 287p.

[Hill, D. R. C., 1996], Object Oriented Analysis and Simulation, Addison Wesley, 1996.

[Hill, D. R. C., 2000], Contribution à la modélisation de systèmes complexes – Application à la simulation d'écosystèmes, Mémoire d'habilitation à diriger des recherches de l'Université Blaise Pascal, spécialité informatique, Clermont-Ferrand, 2000, 123p.

[Jacob, F., 1970, 1976], La logique du vivant, Paris, Gallimard, 1970 ; édition Tel-Gallimard, 1976, 354p.

[Jean, R. V., 1987], Une approche mathématique de la biologie, ouvrage collectif dirigé par Roger V. Jean, Chicoutimi, Gaëtan Morin Editeur, 1987.

[Jorgensen, S. E., 1979], State-of-the-Art in Ecological Modeling, Proc. of the Conference on Ecological Modeling, Copenhagen, Denmark, 28 august – 2 september 1978, Oxford, New-York, ed. By S. E. Jorgensen (International Society for Ecological Modeling), Pergamon Press, 1979, 891p.

[Jorgensen, S. E., 1983], Application of Ecological Modelling in Environmental Management, Part A, Amsterdam, Elsevier Scientific Publishing Company, 1983, 735p.

[Kostitzin, V. A., 1937], Biologie Mathématique, Paris, Armand Colin, 1937, préface de Vito Volterra.

[Laborit, H., 1968], Biologie et structure, Paris, Gallimard, 1968.

[Le Douarin, N., 2000], Des chimères, des clones et des gènes, Paris, Editions Odile Jacob, 2000, 480p.

[Lebreton, J. D. et Asselain, B., 1993], Biométrie et environnement, Paris, Masson, 1993.

[Legay, J. M. et Barbault, R., 1995], La révolution technologique en écologie, collectif dirigé par J. M. Legay et et R. Barbault, Paris, Masson, 1995, 259p.

[Legay, J. M., 1997], L'expérience et le modèle. Un discours sur la méthode, Paris, INRA éditions, 1997,111p.

[Le Treut, H. et Jancovici, J. M., 2001], L'effet de serre, Paris, Flammarion, coll. Dominos, 2001, 125p.

[Lévêque, C., 2001], Ecologie – De l'écosystème à la biosphère, Paris, Dunod, 502p.

[Levin, S., 1991], "Mathematics and Biology", rapport du Workshop organisé par la National Science Foundation, présidé par Simon Levin et qui s'est tenu à l'Université Cornell en 1991, 80p., accessible à l'adresse http://www.bio.vu.nl/nvtb.

[Lewontin, R. C., 1998, 2003], Gene, oganismo e ambiente, Roma-Bari, Gius. Laterza & Figli, 1998 ; traduction augmentée du chapitre 4 : La triple hélice – Les gènes, l'organisme, l'environnement, Paris, Seuil, 2003, 157p.

[Lotka, A. J., 1924, 1956], Elements of Physical Biology, 1924 ; 2nd edition : Elements of Mathematical Biology, Dover Publications, New York, 1956, 465p.

[Malécot, G., 1948], Les mathématiques de l'hérédité, Paris, Masson, 1948, 65p.

[Monod, J., 1970a], Le hasard et la nécessité, Paris, Seuil, 1970.

[Monod, J., 1970b, 2000], « Les frontières de la biologie », Atomes, 1970, octobre ; réimpression : La Recherche, 2000, mai, n°spécial : 30 ans de science et de recherche, pp. 21-24.

[Odum, E. P., 1953, 1959], Fundamentals of Ecology, 2nd edition, Philadelphia, W. B. Saunders Company, 1959, 546p.

[Odum, E. P., 1963, 1975], Ecology, New York, 1963 ; traduction : Ecologie – Un lien entre les sciences naturelles et les sciences humaines, Montréal, édition HRW, 1975, 254p.

[Odum, H. T. et Odum, E. C., 2000], Modelling for all scales – An introduction to system simulation, San Diego, Academic Press, 2000, 458p.

[Orange, C., 1997], Problèmes et modélisation en biologie, Paris, PUF, 1997, 241p.

[Pavé, A., 1994], Modélisation en biologie et en écologie, Lyon, Aléas Editeur, 1994, 559p.

[Pinel, E., 1973], Les fondements de la biologie mathématique non statistique, Paris, Maloine, 1973.

[Pinel, E., 1981], Physique de la cellule vivante, Paris, Maloine, 1981, 162p.

[Randall, J. E., 1980], Microcomputers and Physiological Simulation, London, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1980, 235p.

[Rashevsky, N., 1938, 1948], Mathematical Biophysics (1vol.), Chicago, University of Chicago Press, 1938, first edition : 1938, 2nd edition : 1948.

[Rashevsky, N., 1960a], Mathematical Biophysics – Physico-mathematical Foundations of Biology (2 vol.), Chicago, University of Chicago Press, 1938, 3rd edition : 1960.

[Rashevsky, N., 1961], Mathematical Principles in Biology and their Applications, Springfield – Illinois, Charles C. Thomas Publisher, 1961, 128p.

[Rashevsky, N., 1968], Looking at History through Mathematics, The MIT Press, Cambridge, 1968, 199p.

[Rosen, R., 2000], Essays on Life Itself, New York, Columbia University Press, 2000, 361p.

[Saugier, B., 1996], Végétation et Atmosphère, Paris, Flammarion, coll. Dominos, 1996,126p.

[Schrödinger, E., 1986], What is life ?, Cambridge Univ. Press, 1945 ; traduction de Léon Keffler, préface d'A. Danchin, postface de C. Debru, Paris, Christian Bourgois, 1986.

[Sitharama Iyengar, S., 1992], Structuring Biological Systems – A Computer Modeling Approach, Boca Raton – Ann Arbor – London –Tokyo, CRC Press, ed. By S. Sitharama Iyengar, 1992, 267p.

[Sommerhoff, G., 1950], Analytical Biology, London, Oxford University Press, 208p.

[Stacy, R. W. and Waxman, B., 1965, 1969], Computers in Biomedical Research, New York, Academic Press, 3 vol. (vol. I : 1965, 562p. ; vol. II : 1965, 363p. ; vol. III : 1969, 288p).

[Tomassone, R., Dervin, C. et Masson J. P., 1993], Biométrie. Modélisation de phénomènes biologiques, Paris, Masson, 1993, 576p.

[Varela, F. J., 1979, 1989], Principles of Biological Autonomy, New York, Elsevier - North Holland, 1979 ; traduction modifiée : Autonomie et connaissance, Paris, Seuil, 1989, 245p.

[Vendryès, P., 1942], Vie et probabilité, préface de Louis de Broglie, Paris, Albin Michel, collection « sciences d'aujourd'hui », 1942, 382p.

[Vendryès, P., 1981], L'autonomie du vivant, Paris, Maloine, coll. Recherches Interdisciplinaires, 1981, 149p.

[Vernadsky, W., 1926, 2002], La biosphère, publié en russe en 1926 ; traduction : Paris, Félix Alcan, 1929 ; réédition présentée par J. P. Deléage : Paris, Seuil-Points, 2002, 284p.

[Volterra, V., 1931], Leçons sur la théorie mathématique de la lutte pour la vie, Paris, Gauthier-Villars, 1931 ; réimpression : Paris, Editions Jacques Gabay, 1990, 214p.

[Waddington, C. H., 1962], New Patterns in Genetics and Development, New York, Columbia University Press, 1962.

[Wagensberg, J., 1985, 1997], Ideas sobre la complejidad del mundo, Barcelone, Tusquets Editores, 1985 ; traduction : L'âme de la méduse – Idées sur la complexité du monde, Paris, Seuil, 1997, 170p ; cf. particulièrement le chapitre 5 : « la simulation de la complexité », pp. 91-105.

[Walliser, B., 1977], Systèmes et modèles – Introduction critique à l'analyse des systèmes, Paris, Seuil, 1977, 248p.

[Waterman, T. H. and Morowitz, H. J., 1965], Theoretical and mathematical biology, New York –Toronto – London, Blaisdell Publishing Company, 1965, 427p.

[Watson, J. D., 1968, 2003], The Double Helix, sans lieu, Weidenfeld & Nicolson, 1968 ; traduction : Paris, Robert Laffont : La double hélice, 1968, réimpression : 2003, 215p.

[Weyl, H., 1952, 1964], Symmetry, Princeton University Press, 1952 ; trad. : Symétrie et mathématique moderne, Paris, Flammarion, 1964 avec une préface de G. Th. Guilbaud, 153p.

[Wilson, E. O., 1975], Sociobiology : The New Synthesis, Cambridge, Mass., Harvard University Press, 1975, 697p.

[Wolkowski, Z. W., 1986], Synergie et cohérence dans les systèmes biologiques, 3ème série, Compte-Rendu d'un séminaire transdisciplinaire au Centre Interuniversitaire Jussieu-St Bernard (Universités Pierre et Marie Curie et Paris VII) de novembre 1985 à juin 1986, sous la direction de Z . W. Wolkowski, Paris, ouvrage collectif ronéotypé.

[Woodger, J. H., 1937], The Axiomatic Method in Biology, London, Cambridge University Press, 1937, 174p.

Articles ou chapitres d'ouvrages

[Balaceanu, C., 1971], « La pensée cybernétique en biologie », Recherches sur la philosophie des sciences, Bucarest, Editions de l'Académie de la République Socialiste de Roumanie, 1971, p. 245-260.

[Bauer, P. S., 1930], "The validity of minimal principles in physiology", The Journal of General Physiology, July 1930, vol. 13, pp. 617-619.

[Bettayeb, K., 2002], « La cellule virtuelle est née », Science et Vie, n°1015, avril 2002, pp. 64-67.

[Bignone, F. A., 1992], "Cells-Gene Interactions Simulation on a Coupled Map Lattice", article publié sans lieu, acccessible à l'adresse http://gendyn.ist.unige.it/diffelpr/diffelpr.html.

[Chatelin, Y., 1996], « Genèse, mutation et éclatement des paradigmes, le cas de la science des sols tropicaux », Les sciences hors d'Occident au vingtième siècle, vol. 3 : « Nature et environnement », ORSTOM-éditions, 1996, dir. Yvon Chatelin, pp.141-153.

[Chen, J., 2001], A Bioinformatics Discovery-oriented Computing Framework, PhD Thesis, Chapter 1-2, 2001 : http://www-users.cs.umn.edu/~ychen/Research/thesis_Jake_Chen_c1_c2.pdf, 27p.

[Cheruy, A., Gautier, C. et Pavé, A., 1980], « Analyse de systèmes biologiques : certains aspects méthodologiques liés à la modélisation », in [Lesourne, J., 1980], Tome I, pp. 73-152.

[Chiaraviglio, L., 1965], "Sequential Machines and the Coding of Polypeptides", Journal of Theoretical Biology, vol. 8, 1965, pp. 130-140.

[Cohn, D. L., 1954a], "Optimal systems : I. The vascular system", Bulletin of mathematical biophysics, vol. 16, 1954, pp. 59-74.

[Cohn, D. L., 1954b], "Optimal systems : II. The vascular system", Bulletin of mathematical biophysics, vol. 17, 1955, pp. 219-227.

[Cole, K. S., 1965], "Theory, experiment, and the nerve impulse", in [Waterman, T. H. and Morowitz, H. J., 1965], pp. 136-171.

[Coli, P. Y., Alexandrian, D., Binggeli, F. et Coste, N., 2004], « La simulation des sautes de feu », Pour la science, n°322, août 2004, pp. 30-37.

[Dantzig, G. B., 1965], "New mathematical methods in the life sciences", in [Stacy, R. W. and Waxman, B., 1965, 1969], pp. 33-46.

[Fleury, V, Watanabe, T., Nguyen, T. H. et Unbekandt, M., 2003], « La complexité des organes », Pour la science, décembre 2003, n°314, pp. 98-103.

[Franc, A., Besnard, J., Klein, E., 1995], « Simulation de la dynamique des peuplements forestiers hétérogènes : quelques pistes à l'aide de modèles simples », Revue Forestière Française, vol. XLVII, n°spécial, 1995, pp. 183-191.

[Garfinkel, D., 1962], "Digital Computer Simulation of Ecological Systems", Nature, 194, 1962 (June), pp. 856-857.

[Garfinkel, D., 1965], "Computer simulation in biochemistry and ecology", in [Waterman, T. H. and Morowitz, H. J., 1965], pp. 292-310.

[Garfinkel, D., 1969], "Simulation of glycolytic systems", in [Heinmetz, F., 1969], pp. 1-74.

[Goulard, M., 1998], « La place de la modélisation mathématique ou informatique dans la problématique environnementale », Les dossiers de l'environnement de l'INRA, n°17: « Sciences de la société et environnement à l'INRA », INRA-éditions, décembre 1998, pp. 73-83.

[Grandjouan, G., 1996], « Transposition géométrique ou simulation probabiliste ? Choix d'un modèle statistique des relations écologiques en milieu naturel », Tendances nouvelles en modélisation pour l'environnement, Actes du colloque CNRS des 16-17 janvier 1996 – Programme Environnement du CNRS, Paris, 1996, édition complète à diffusion restreinte, fascicule A des « communications orales », pp. 71-76.

[Grimm, V., 1999], "Ten years of individual-based modeling in ecology: what have we learned and what could we learn in the future ? ", Ecological Modelling, 115 (1999), pp. 129-148.

[Grodins, F. S., 1965], "Computer simulation of cybernetic systems", in [Stacy, R. W. and Waxman, B., 1965, 1969], Tome I, pp. 135-164.

[Hesketh, J. D. et Jones, J. W., 1976], "Some Comments on Computer Simulators for Plant Growth – 1975", Ecological Modelling, 2 (1976), pp. 235-247.

[Hill, D.R.C., 1995], "Verification and Validation of Ecosystem Simulation Models", in Summer Simulation Conference, July 24-26, Ottawa, Canada, pp. 176-182.

[Kepper (de), P., Dulos, E., Wit (de), A., Dewel, G. et Borckmans, P., 1998], « Tâches, rayures et labyrinthes », [La Recherche, 1998, 305], pp. 84-89.

[Konopka, A. K., 2003], "Selected dreams and nightmares about computational biology", Computational Biology and Chemistry, 2003, vol. 27, pp. 91-92.

[Lebreton, J. D., 1973], « Introduction aux modèles mathématiques de la dynamique des populations », in Informatique et Biosphère, 1973, pp. 75-116.

[Ledley, R. S., 1959], "Digital Electronic Computers in Biomedical Science", Science, vol. 130, n°3384, 6 November 1959, p. 1225-1234.

[Ledley, R. S., 1965], "Scope of computer applications", in [Waterman, T. H. and Morowitz, H. J., 1965], pp. 250-291.

[Legay, J. M., 1973a], « La méthode des modèles, état actuel de la méthode expérimentale », in Informatique et Biosphère, 1973, pp. 5-73.

[Legay, J. M., 1973b], « Introduction à l'étude des modèles à compartiments », in Informatique et Biosphère, 1973, pp. 117-145.

[Legay, J. M., 1979a], « Avant-propos », avant-propos du n° spécial sur le thème « Le ver à soie, modèle biologique » de la revue Biochimie, 1979, n°61, pp. 135-136.

[Legay, J. M., 1979b], "Oocyte Growth", Biochimie, 1979, n°61, pp. 137-145.

[Legay, J. M., 1980], « L'informatique et les sciences de la vie », article de l'Encyclopædia Universalis de 1980, remanié pour l'édition de 1989 sur CD-ROM (1995), 6p.

[Legay, J. M., 1986a], « Qu'est-ce que la biométrie ? », Le courrier du CNRS, n°64, 1er mars 1986, pp. 56-61.

[Legay, J. M., 1986b], « Diversification des modèles de développement rural : questions et méthodes », transcription de l'intervention au Colloque National du Ministère de la Recherche et de la Technologie, Paris, 17-18 avril 1986, communication personnelle, 10 pages.

[Legay, J. M., 1987], « Contribution à l'étude de la complexité dans les systèmes biologiques », Biologie théorique, Actes du Colloque de Solignac de 1985, Paris, CNRS édition, 1987, pp. 147-165 ; cf. également in Biologie et Economie, éd. par J. Demongeot et P. Malgrange, Dijon, Librairie de l'Université de Bourgogne, 1987, pp. 29-47.

[Legay, J. M., 1990], « De la complexité des objets à la méthode des modèles – Synthèse des travaux du colloque », in [CNRS, 1990], pp. 235-239.

[Legay, J. M., 1994], « La mesure dans les systèmes complexes », in La mesure : instruments et philosophes, Actes du Colloque des 28-29 octobre 1993, au Centre d'Analyse des Formes et des Systèmes de la Faculté de Philosophie de Lyon III, Paris, Champ-Vallon, 1994, pp. 139-146.

[Legay, J. M. et Chessel, D., 1977], « Description et analyse de la répartition des insectes dans une population végétale. Cas du doryphore sur pommes de terre », Bulletin d'Ecologie, n°8, pp. 23-34.

[Legay, J. M. et Chessel, D., 1984], « Effectif et taux de masculinité des groupes de chats dans les familles humaines (région lyonnaise) », Génétique Sélection Evolution, n° 16, pp. 185-194.

[Legay, J. M. et Mourgues, C., 1966], « Du rôle de l'héritabilité maximale d'un ensemble de caractères dans l'évolution de ces caractères », Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences, séances hebdomadaires, série D, tome 262, 2 mai 1966, pp. 1979-1981.

[Legay, J. M. et Tran-Bugot, A., 1974], « Sur la stabilité morphologique de l'ovocyte terminé chez Bombyx mori *L.* », Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences, séances hebdomadaires, série D, tome 278, 11 mars 1974, pp. 1517-1520.

[Le Guyader, H., 1985], « Taxinomie et biologie théorique », in [Solignac-1985, 1987], pp. 167-175.

[Le Hir, P., 2003], « Modéliser le vent pour mieux lutter contre les feux de forêt », Le Monde, 11 juin 2003, p. 24.

[Lewontin, R. C., 1974, 2003], "Biological Models", Dictionnary of the History of Ideas, New York, ed. by Philip P. Wiener, published by Charles Scribner's Sons, 1974, vol. 1, pp. 242-247 ; reproduit sur le site du "Electronic Text Center" (University of Virginia Library) : http://etext.lib.virginia.edu/DicHist/dict.html.

[Lubashevsky, I.A., Gafiychuk, V.V., 2002], "Analysis of the optimality principles responsible for vascular network architectonics", 12 pages, e-print accessible sur http://arxiv.org/pdf/adap-org 9909003.

[Lucas, H. L., 1964], "Stochastic Elements in Biological Models ; Their Sources and Significances", Stochastic Models in Medicine and Biology, Proc. of a symposium conducted by the Mathematics Research Center, US Army, at the University of Wisconsin, June 12-14, 1963, ed. by J. Gurland, Madison, The University of Wisconsin Press, 1964, pp. 355-385.

[Mayrat, A., Rollin, P. et Kahn, A., 1990, 1995], « Croissance (biologie) », article de l'Encyclopaedia Universalis, édition 1989, sur CD-ROM : 1995, 20 pages.

[Mejer, H., 1983], "The Computer as a Modelling Tool", in [Jorgensen, S. E., 1983], pp. 17-53.

[Michalsky, J. et Arditi, R., 1996], « La structure de réseau trophique à l'équilibre et loin de l'équilibre : est-elle la même ? », in Tendances nouvelles en modélisation pour l'environnement, Actes du colloque CNRS des 16-17 janvier 1996 – Programme Environnement du CNRS, Paris, 1996, édition complète à diffusion restreinte, fascicule « posters : thème A », pp. 134-138.

[Milcou, S. M., 1971], « Les mathématiques dans les sciences biologiques et médicales », in Recherches sur la philosophie des sciences, Bucarest, Editions de l'Académie de la République Socialiste de Roumanie, 1971, p. 233-243.

[Mode, C.J., 1966a], "Some multi-dimensional branching processes as motivated by a class of problems in mathematical genetics I", Bulletin of Mathematical Biophysics, vol. 28, 1966, pp. 25-50.

[Mode, C.J., 1966b], "Restricted transition probabilities and their applications to some problems in the dynamics of biological populations", Bulletin of Mathematical Biophysics, vol. 28, 1966, pp. 315-331.

[Mode, J.C., 1966c], "A multi-dimensional birth process and its application to some problems in the dynamics of biological populations", Bulletin of Mathematical Biophysics, vol. 28, 1966, pp. 333-345.

[Murray, C. D., 1926], "The physiological principle of minimum work applied to the angle of branching arteries", The Journal of General Physiology, July 1926, vol. 9, pp. 835-841.

[Murray, C. D., 1927], "A relationship between circumference and weight in trees and its bearing on branching angles", The Journal of General Physiology, May 1927, vol. 10, pp. 725-729.

[Murray, C. D., 1931], "The physiological principle of minimum work – A reply", The Journal of General Physiology, March 1931, vol. 14, p. 445.

[Pavé, A., 1979], "Dynamics of macromolecular populations : a mathematical model of the quantitative changes of RNA in the silkgland during the last larval instar", Biochimie, 1979, n°61, pp. 263-273.

[Pavé, A., 1987], « Schémas fonctionnels et modélisation. Etudes de modèles de la dynamique des populations », in Biologie et Economie, éd. par J. Demongeot et P. Malgrange, Dijon, Librairie de l'Université de Bourgogne, 1987, pp. 223-250.

[Poorter, H., 1989], ”Plant Growth Analysis : towards a synthesis of the classical and the functional approach”, Physiologia Plantarum, 1989, vol.75, pp. 237-244.

[Poorter, H. et Garnier, E., 1996], “Plant Growth Analysis : an evaluation of experimental design and computantional methods”, Journal of Experimental Botany, September 1996, vol. 47, pp. 1343-1351.

[Pring, M., 1969], “The analysis of electron transport kinetics in mitochondria”, in [Heinmetz, F., 1969], pp. 75-104.

[Quastler, H., 1965], “General principles of systems analysis”, in [Waterman, T. H., and Morowitz, H. J., 1965], pp. 313-333.

[Rashevsky, N., 1934a], “Foundations of Mathematical Biophysics”, Philosophy of Science, 1934, vol. 1, n°2, pp. 176-196.

[Rashevsky, N., 1934b], “Physico-Mathematical Aspects of the Gestalt-Problem”, Philosophy of Science, 1934, vol. 1, n°4, pp. 409-419.

[Rashevsky, N., 1935a], “The Biophysics of Space and time”, Philosophy of Science, 1935, vol. 2, n°1, pp. 73-85.

[Rashevsky, N., 1935b], “Outline of a Mathematical Theory of Human Relation”, Philosophy of Science, 1935, vol. 2, n°4, pp. 413-430.

[Rashevsky, N., 1955], “Life, information theory, and topology”, Bulletin of Mathematical Biophysics, vol. 17, 1955, pp. 229-235.

[Rashevsky, N., 1958a], “A contribution to the search of general mathematical principles in biology”, Bulletin of Mathematical Biophysics, vol. 20, 1958, pp. 71-93.

[Rashevsky, N., 1958b], “A comparison of set-theoretical and graph-theoretical approaches in topological biology”, Bulletin of Mathematical Biophysics, vol. 20, 1958, pp. 267-273.

[Rashevsky, N., 1958c], “A note on biotopology of reproduction”, Bulletin of Mathematical Biophysics, vol. 20, 1958, pp. 275-280.

[Rashevsky, N., 1960b], “Mathematical Models and General Mathematical Principles in Biology”, Nuovo Cimento, supplemento al volume XVIII, série X, n°2, 4ème trimestre, pp. 140-148.

[Rashevsky, N., 1964], “The devious roads of science”, in [Gregg, J. R. et Harris, F. T. C., 1964], pp. 51-58.

[Rashevsky, N., 1965], “Models and Mathematical Principles in Biology”, in [Waterman, T. H. and Morowitz, H. J., 1965], pp. 36-53.

[Rashevsky, N., 1966a], “Physics, biology, and sociology : a reappraisal”, Bulletin of Mathematical Biophysics, vol. 28, 1966, pp. 283-308.

[Rashevsky, N., 1966b], “On mass behavior”, Bulletin of Mathematical Biophysics, vol. 28, 1966, pp. 465-475.

[Rashevsky, N., 1966c], “A sociological approach to biology”, Bulletin of Mathematical Biophysics, vol. 28, 1966, pp. 655-661.

[Rashevsky, N., 1968], “Neurocybernetics as a particular case of general regulatory mechanisms in biological and social organisms”, L’Age de la science, n°4, octobre-décembre 1968, Paris, Dunod, pp. 243-258.

[Reichardt, W., 1965], “Nervous processing of sensory information”, in [Waterman, T. H. and Morowitz, H. J., 1965], p. 344-370.

[Rosen, R., 1958a], “A relational theory of biological systems”, Bulletin of Mathematical Biophysics, vol. 20, 1958, pp. 245-260.

[Rosen, R., 1958b], “The representation of biological systems from the standpoint of the theory of categories”, Bulletin of Mathematical Biophysics, vol. 20, 1958, pp. 317-341.

[Rosen, R., 1968a], “On analogous systems”, Bulletin of Mathematical Biophysics, vol. 30, 1968, pp. 481-492.

[Rosen, R., 1968b], “Turing’s morphogens, two-factors systems and active transport”, Bulletin of Mathematical Biophysics, vol. 30, 1968, pp. 493-499.

[Rousseau, B. et Rechenman, F., 1987], « Le projet EDORA. Vers un poste de travail informatique pour l’aide à la modélisation des systèmes dynamiques en biologie », in Biologie et Economie, éd. par J. Demongeot et P. Malgrange, Dijon, Librairie de l’Université de Bourgogne, 1987, pp. 203-221.

[Sauvan, J., 1966], « Méthode des modèles et connaissance analogique », Revue d’Agressologie, 7, 1, pp. 9-18.

[Schaff, J. et Loew, L. M., 1999], “The Virtual Cell”, Pacific Symposium on Biocomputing, 4, pp. 228-239; disponible sur www.nrcam.uchc.edu/publications/vcell_publications.html .

[Schmitt, B., 1984], « Biologie et mathématiques », Revue du Palais de la Découverte, 1984, vol. 12, n°119, pp. 21-26.

[Schreiner, W., Neumann, M., Neumann, F., Roedler, S. M., End, A., Buxbaum, P., Müller, M. R. and Spieckerman, P., 1994], “The Branching Angles in Computer-generated Optimized Models of Arterial Trees“, The Journal of General Physiology, vol. 103, June 1994, pp. 975-989.

[Sheppard, C. W., 1969], “Computer simulation of stochastic processes through model-sampling (Monte-Carlo) techniques”, FEBS Letters, Vol. 2, Supplement, March 1969, pp. S14- S21.

[Skellam, J. G., 1971], "Some philosophical aspects of mathematical modelling in empirical science with special reference to ecology", Mathematical models in ecology. The 12th symposium of the British Ecological Society, 23-24 march, 1971, J. N. R. Jeffers ed., Oxford, London, Edinburgh, Melbourne, Blackwell Scientific Publ., 1977, p. 27.

[Slobodkin, L. B., 1958], ”Meta-models in theoretical ecology”, Ecology, 1958, vol. 39, p. 3.

[Stahl, W. R., 1962], “Similarity and Dimensional Methods in Biology”, Science, vol. 137 (July 1962), pp. 205-212.

[Stahl, W. R., 1965], “Algorithmically Unsolvable Problems for a Cell Automaton“, Journal of Theoretical Biology, vol. 8, 1965, pp. 371-394.

[Stahl, W. R., 1967a], ”Measures of Organization in a Model of Cellular Self-Reproduction Based on Turing-Machine“, Proc. of the 5th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, vol. IV, ed. by L. LeCam and J. Neyman, Berkeley, University of California Press, 1967, pp. 581-607.

[Stahl, W. R., 1967b], “A Computer Model of Cellular Self-reproduction“, Journal of Theoretical Biology, vol. 14, 1967, pp. 187-205.

[Stahl, W. R., 1967c], “The Role of Models in Theoretical Biology“, Progress in Theoretical Biology, vol. 1, 1967, n°1, pp. 165-218.

[Stahl, W. R. et Cummerson, J. Y., 1967], “Systematic Allometry in Five Species of Adult Primates (Sytematic Allometry in Primates)”, Growth, vol. 31, 1967, pp. 21-34.

[Stahl, W. R. et Goheen, H. E., 1963], “Molecular Algorithms”, Journal of Theoretical Biology, vol. 5, 1963, pp. 266-287.

[Zamir, M., 1976], “The Role of Shear Forces in Arterial Branching”, The Journal of General Physiology, vol. 67, 1976, pp. 213-222.

Colloques

[EPHE, 1978], La morphogenèse : de la biologie aux mathématiques, actes de trois colloques interdisciplinaires organisés par l’Ecole Pratique des Hautes Etudes et sous la direction de Y. Bouligand en janvier, mars et octobre 1978, Paris, édition Maloine, coll. Recherches Interdisciplinaires », 1980, 199p.

[CEMAGREF, 1998], Modèles et systèmes multi-agents pour la gestion de l’environnement et des territoires, Actes du colloque SMAGET, 5-8 octobre 1998, coordinateur : Niels Ferrand, Clermont-Ferrand, CEMAGREF Editions, 1999, 466p.

[CIRAD-INRA, 2001], Modélisation des agroécosystèmes et aide à la décision, collectif édité par Eric Malézieux, Guy Trébuil et Marc Jaeger, édition conjointe : Montpellier et Versailles, Librairie du CIRAD et INRA éditions, 2001, 447p.

[CNRS, 1982], Modélisation mathématique et simulation des systèmes de l’environnement, Textes du 1er séminaire du Programme Interdisciplinaire de Recherche sur l’Environnement du CNRS, coordonnateur : J. Aguilar-Marin, Toulouse, Editions du CNRS, Centre régionale de Toulouse, 1982, 207p.

[CNRS, 1990], La modélisation, confluent des sciences, Actes du colloque interdisciplinaire des 15 et 16 juin 1989 de Villeurbanne, coordonnateurs : M. Brissaud, M. Forsé, A. Sighed, Paris, Editions du CNRS, Centre Régionale de Lyon, 1990, 242p.

[CNRS, 1996], Tendances nouvelles en modélisation pour l’environnement, Actes du colloque CNRS des 16-17 janvier 1996 (choix d’interventions) – Programme Environnement du CNRS, version publiée aux éditions Elzevier, Paris, 1997, 445p.

[Solignac-1982, 1983], Biologie théorique - Solignac 1982, Actes du deuxième séminaire de l’Ecole de Biologie Théorique du CNRS, Solignac, 20-22 septembre 1982, publiés sous la responsabilité de H. Le Guyader, Rouen, Publications de l’Université de Rouen, 1983, 483p.

[Solignac-1985, 1987], Biologie théorique – Solignac 1985, Actes du colloque de Solignac de 1985, sous la responsabilité de H. B. Lück, Paris, Editions du CNRS, 1987, 311p.

[Solignac-1986, 1988], Biologie théorique – Solignac 1986, Actes du colloque de Solignac de 1986, sous la responsabilité de A. Krettzschmar, Paris, Editions du CNRS, 1988, 429p.

[Solignac, 1994], La biologie théorique à Solignac, 13 articles extraits de différents colloques tenus à Solignac et publiés sous la direction de H. Vérine, Paris, Polytechnica, 1994, 204p.

II- Sur la croissance de végétaux, leur architecture et leur modélisation :

Ouvrages généraux

[Bouchon, J., 1995], sous la dir. de, Architecture des arbres fruitiers et forestiers, Actes du colloque des 23-25 novembre 1993 (Montpellier), Paris, INRA-éditions, collection « Les colloques », n°74, 1995, 349pp.

[Bouchon, J., Reffye (de), Ph., Barthélémy, D., 1997], Modélisation et simulation de l’architecture des végétaux, Paris, INRA-éditions, collection « Science Update », (suite des actes du colloque sus-cité), 1997, 435pp.

[Fleury, V. et Bouligand, Y., 2004], Les formes de la vie, Pour la science, Dossier hors-série, dirigé par Vincent fleury et Yves bouligand, juillet-septembre 2004, 120p.

[Goethe, J. W. von, 1790-1807, 1884, 1992], La métamorphose des plantes, traduction de H. Bideau, 1975, Paris, éditions Triades, réédition : 1992, 272p.

[Guillevic, P., 1999], Modélisation des bilans radiatif et énergétique des couverts végétaux, thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, spécialité « télédétection de la biosphère continentale – modélisation », soutenue le 13 décembre 1999, http://gershwin.ens.fr/great/these_Guillevic_1999.pdf, 186p.

[Hallé, F., 1979], « Modèles architecturaux chez les arbres tropicaux », in [Delattre, P. et Thellier, M., 1979], pp. 537-550.

[Hallé, F., Oldeman, R. A. A., 1970], Essai sur l'architecture et la dynamique de croissance des arbres tropicaux, Paris, Masson, 1970, 178p.

[Hallé, F., Oldeman, R. A. A., Tomlinson P. B., 1978], Tropical trees and forests. An architectural analysis, New York, Heidelberg, Berlin, Springer Verlag, 1978, 441p.

[INRA-Grignon, 1997], Modélisation architecturale, éd. par Andrieu, B., Actes du séminaire des 10-12 mars 1997, département de Bioclimatologie, INRA-Grignon, document interne.

[Jean, R. V., 1978], Phytomathématique, Montréal, 1978, 271p.

[Jean, R. V., 1983], Croissance végétale et morphogenèse, Paris, Québec, Masson, Presses de l'Université du Québec, 1983, 323p.

[Jean, R. V., 1994, 1995], Phyllotaxis – A Systemic Study in Plant Morphogenesis, Cambridge University Press, 1994 ; reprinted : 1995, 386p.

[Jean, R. V. et Barabe, D., 2001], "Application of Two Mathematical Models to the Araceae, a Family of Plants with Enigmatic Phyllotaxis", Annals of Botany, 2001, vol. 88, pp. 173-186.

[Kaandorp, J. A., 1994], Fractal Modeling Growth and Form in Biology, New York, Springer Verlag, 1994.

[Lindenmayer, A., Rozenberg G., 1976], Automata, Languages, Development, ed. by A. Lindenmayer, and G. Rozenberg, Amsterdam, North-Holland Publishing Company, 1976, 529p.

[Luquet, D., 2002], Suivi de l'état hydrique des plantes par infrarouge thermique, thèse de doctorat de l'Institut National Agronomique Paris-Grignon, soutenue le 11 janvier 2002, http://www.teledetection.fr/fichier/these_2/these_luquet.pdf, 167p.

[Mandelbrot, B., 1975], Les objets fractals : forme, hasard et dimension, Paris, Flammarion, 1975.

[Mandelbrot, B., 1977], The fractal geometry of nature, New York, Freeman, 1977, 468p ; particulièrement les chapitres 16 et 17, pp. 151-165.

[Michalewicz, M. T., 1997], Plants to ecosystems. Advances in Computational Life Sciences, Vol. 1: "Modelling of Biological Structures and Processes", Melbourne, CSIRO Publishing, Michalewicz ed., 1997, 140p.

[Napur, J. N., 1988], Mathematical Modelling, New York, John Wiley & Sons, 1988, 511p.

[Oldeman, R. A. A, 1974], L'architecture de la forêt guyanaise, Paris, Mémoire de l'ORSTOM, n°73, 1974, 204p.

[Prusinkiewicz, P. et Lindenmayer, A., 1990], The algorithmic beauty of plants, New York, Springer Verlag, 1990, 228p.

[Stevens, P. S., 1974], Patterns in Nature, Boston, Toronto, An Atlantic Press Book Little, Brown and Company, 240p.

[Thompson, d'Arcy (Sir), 1917, 1961, 1994], On Growth and Form, Cambridge University Press, 1917, nouv. éd., 1942, abrégée en 1961 par John Tyler Bonner ; traduction par Dominique Teyssié : Paris, Seuil, collection « Sources du savoir », 1994, 336p.

[Vinci (de), L., 1508-1518, 1942, 1987], Les carnets de Léonard de Vinci, Tome I, carnets de 1508-1518, traduction française d'une édition anglaise de 1906 : Paris, Gallimard, 1942 ; réimpression : Paris, Tel-Gallimard, 1987, 669p.

[Wardlaw, C. W., 1968], Essays on Form in Plants, Manchester University Press, Machester, 1968, 399p.

Articles

[Abelson, H., 1976], "Logo graphics as a mathematical environment", Proc. of the Annual Conference of the Association of Computing Machinery, ACM-CSC-ER, Houston, ACM-Press, 1976, pp. 159-163.

[Amzallag, G. N., 2003], « La complexité végétale », Pour la science, n°314, décembre 2003, pp. 128-133.

[Andrieu, B., 1997], « Modélisation architecturale du fonctionnement des cultures : Orientations de l'équipe de Bioclimatologie de Grignon », [INRA-Grignon, 1997], pp. 15-18.

[Aono, M., Kunii, T.L., 1984], "Botanical Tree Image Generation", IEEE CG&A, may 1984, pp. 10-34.

[Barker, S. B., Cumming, G. et Horsfield, K., 1973], "Quantitative Morphometry of the Branching Structures of Trees", Journal of Theoretical Biology, 1973, 40, pp. 33-43.

[Barthélémy, D., 1991], "Levels of organization and repetition phenomena", Acta Biotheoretica, vol. 39, pp. 309-323.

[Barthélémy, D., Blaise, F., Fourcaud, T., Nicolini, E., 1995], « Modélisation et simulation de l'architecture des arbres : bilan et perspectives », Revue Forestière Française, n°spécial de 1995, vol. 47, pp. 71-96.

[Barthélémy, D., Edelin, C., Hallé, F., 1989], "Architectural concepts for tropical trees", Tropical Forests : Botanical Dynamics, Speciation and Diversity, ed. by L.B. Holm-Nielsen, I. Nielsen and H. Balslev, London, Academic Press, 1989, pp. 89-100.

[Beaumont, J. H., 1939], "An analysis of growth and yield relationships of coffeetrees in the Kona district, Hawaii", Journal of Agricultural Research (Washington), vol. 59, n° 3, Aug. 1, 1939, pp. 223-235.

[Beemster, G. T. et Baskin, T. I., 1998], “Analysis of cell division and elongation underlying the developmental acceleration of root growth in Arabidopsis thaliana”, Plant Physiology, April 1998, 116 (4), pp. 1515-1526.

[Bell, A. D., 1976], “Computerized Vegetative Mobility in Rhizomatous Plants”, in [Lindenmayer, A. et Rozenberg, G., 1976], pp. 3-14.

[Blaise, F., 1992], « Simulation de couverts végétaux réalistes en 3D », XVIIème Congrès I.S.P.R.S., USA, Washington, DC / L.W. Fritz, J.R. Lucas Eds, Archives internationales de Photogrammétrie et de télédétection, 1992, 24, B3, (3), pp. 207-212.

[Blaise, F., Reffye (de), Ph., 1994], « Simulation de la croissance des arbres et influence du milieu : le logiciel AMAPpara », in Proceedings of the 2nd African Conference on Research, Computer Science (CARI’94), Ouagadougou, Burkina Faso, 12-18 October 1994 / J. Tankoano, Ed. INRIA, ORSTOM, 1994, pp. 61-75.

[Blaise, F., Barczi, J. F., Jaeger, M., Dinouard P. et Reffye (de), Ph., 1998], “Simulation of the growth of plants – Modeling of metamorphosis and spatial interactions in the architecture and development of plants”, Cyberworlds, ed. By Kunii TL. and Luciani L., Springer Verlag, Tokyo, 1998, pp. 81-109.

[Bloomenthal, J., 1985], “Modeling the Mighty Maple”, Computer Graphics, vol. 19 (3), July 1985, pp. 305-311.

[Borchert, R. et Honda, H., 1984], “Control of Development in the Bifurcating Branch System of *Tabebuia Rosea* : A Computer Simulation”, Botanical Gazette, 1984, 145 (2), pp. 184-195.

[Buck-Sorlin, G. H. et Bachmann, K., 2000], “Simulating the morphology of barley spike phenotypes using genotype information”, Agronomie, 2000, vol. 20, pp. 691-702.

[Bruneau de Miré, Ph. et Lotodé, R., 1974], « Comportement de familles hybrides de cacaoyers soumis aux attaques d’homoptères », Café, Cacao, Thé, Vol. 18, n°3, juil.-sept. 1974, pp. 216-220.

[Capot, J., 1972], « L’amélioration du caféier en Côte d’Ivoire – Les hybrides ‘Arabusta’ », Café, Cacao, Thé, vol. 16, n°1, janvier-mars 1972, pp. 3-16.

[Capot, J., Dupautex, B. et Durandeau, A., 1968], « L’amélioration du caféier en Côte-d’Ivoire – Duplication chromosomique et hybridation », Café, Cacao, Thé, vol. 12, n°2, avril-juin 1968, pp. 114-125.

[Cohen, D., 1967], “Computer Simulation of Biological Pattern Generation Processes”, Nature, vol. 216, october 21. 1967, pp. 246-248.

[Cohen, D., 2002], “Scientific Bibliography“, 2000, accessible sur le site http://www.evolutionary-ecology.com/cohenhd.html.

[Collot, F., 1991], « L’entropie généralisée (G-entropie), une mesure des nivaux d’organisation », Acta Biotheoretica, 1995, vol. 39, pp. 287-298.

[Collot, F., 1992], « Un essai de généralisation du concept d’entropie : application à l’information, la biologie, la sociologie, la théorie générale des systèmes », Actes du 114ème Congrès National des Sociétés Savantes, Paris 1989, Editions du CTHS, 1992, pp. 73-86.

[Collot, F., 1995], « Corrélations entre complexification et instabilité dans une formalisation du concept de complexité », Acta Biotheoretica, 1995, vol. 43, pp. 195-204.

[Costes, E., Guédon, Y., Lichou, J., Reffye (de), Ph., 1992], “Stochastic Modelling of Plant Growth”, Actes du congrès GERB, 1992, pp. 41-46.

[Costes, E., Reffye (de), Ph., Lichou, J., Guédon, Y., Audubert, A. et Jay, M., 1992], “Stochastic modelling of apricot growth units and branching”. 3rd Int. Symposium on Computer Modelling in Fruit Research and Orchard Management, New Zealand, Palmerston North, Acta Horticulturae, 313, 1992, pp. 89-98.

[Dauzat, J., 1993], “Simulated Plants and Radiative Transfer Simulations”, Colloque Saumane, 1993, communication personnelle, 8p.

[Dauzat, J., 1994], “Radiative Transfer Simulation on Computer Models of *Elaeis guineensis*”, Oléagineux, vol. 49, n°3, 1994, pp. 8-90.

[Dauzat, J., Hautecoeur, O., 1991], « Simulation des transferts radiatifs sur maquettes informatiques de couverts végétaux », Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing, European Space Agency (ESA), Courchevel, France, 14-18 january 1991; J. J. Hunt Ed., 1991, pp. 415-418.

[Daviero, V., Meyer-Berthaud, B., Lecoustre, R., 2000], “Computer simulation of sphenopsid architecture. I. Principles and methodology”, Review of Palaeobotany and Palynology, 109, 2000, pp. 121-134.

[Demarly, Dattée, Kammacher, Essad, 1975], « Rapport sur la Thèse de M. Philippe Verchère de Reffye », Université Paris-Sud, Centre d’Orsay, Doctorat de 3ème cycle en amélioration des plantes, soutenu le 22 septembre 1975, 3 pages.

[Dreyfus, Ph., 1999], « Diversité des approches fonctionnelles de la dynamique et de la production des peuplements : intérêts pour la gestion sylvicole », Revue Forestière Française, 1999, vol. 2, édition spéciale des 50 ans, pp. 281-297.

[Dzierzon, H. et Kurth, W., 2002], “LIGNUM : A Finnish tree growth model and ist interface to the French AMAPmod database”, Scales, Hierarchies and Emergent Properties in Ecological Models, Franz Hölker (ed.), Frankfurt am Main, Peter Lang, 2002, pp. 29-46.

[Eden, M., 1958], “A probabilistic model for morphogenesis”, Symposium on Information Theory in Biology, New York, Pergamon Press, 1958.

[Eden, M., 1960], “A two-dimensional growth process”, Fourth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, Berkeley, University of California Press, 1960.

[Erickson, R. O., 1966], ”Relative Elemental Rates and Anisotropy of Growth in Area : a Computer Programme“, Journal of Experimental Botany, 1966, vol. 17, n° 51, May 1966, pp. 390-403.

[Erickson, R. O., 1976], “Modeling of Plant Growth”, Annual Review of Plant Physiology, 1976, vol. 27, pp. 407-434.

[Ferraro, P., Godin, C., 2000], “A distance measure between plant architectures”, Annals of Forest Science, 57, 2000, pp. 445-461.

[Fisher, J.B., 1992], “How predictive are computer simulations of tree architecture ?”, International Journal of Plant Sciences,153 (3), pp. 137-146.

[Fisher, J. B., Honda, H., 1977], “ Computer simulation of branching pattern and geometry in *Terminalia (Combretaceae)*, a tropical tree”, Botanical Gazette, 138 (4), pp. 377-384, 1977.

[Fisher, J. B., Honda, H., 1979a], “Branch geometry and effective leaf area : a study of *Terminalia* branching pattern, 1. Theoretical Trees”, American Journal of Botany, 1979, 66 (6), pp. 633-644.

[Fisher, J. B., Honda, H., 1979b], “Branch geometry and effective leaf area : a study of *Terminalia* branching pattern, 2. Survey of Real Trees”, American Journal of Botany, 1979, 66 (6), pp. 633-644.

[Fourcaud, Th., 1993], « Modélisation mécanique de la croissance des végétaux », Colloque national en calcul des structures, Giens (France), 11-14 mai 1993, Hermès 1993, pp. 131-148.

[Fournier, A., 1987], “Prolegomenon in modelling of natural phenomena”, Course notes 16, Siggraph’87, Anaheim.

[Fournier, C., 2000], « Modélisation des interactions entre plantes au sein des peuplements. Application à la simulation des régulations de la mophogenèse aérienne du maïs (*Zea mays L.*) par la compétition pour la lumière », Résumé de thèse, 2000, accessible sur http://www.inra.fr/thses/resumes/fournier.html.

[Fournier, C. et Andrieu, B., 1997], « Utilisation de l’approche L-système pour la modélisation architecturale du développement du maïs », [INRA-Grignon, 1997], pp. 203-211.

[Fournier, C. et Andrieu, B., 1998], “A 3D Architectural and Process-Based Model of Maize Development”, Annals of Botany, 1998, vol. 81, pp. 233-250.

[Fournier, C. et Andrieu, B., 2000], “Dynamics of the Elongation of the Internodes in Maize (*Zea mays L.*) : Analysis of Phases of Elongation and their Relationships to Phytomer Development”, Annals of Botany, 2000, vol. 86, pp. 551-563.

[Françon, J., 1984], « Arbres et nombres de Strahler dans diverses sciences », Revue du Palais de la Découverte, 1984, vol. 12, n°120, pp. 29-36.

[Françon, J., 1991], « Sur la modélisation informatique de l’architecture et du développement des végétaux ». In Edelin C., éd., 2ème Colloque international sur l’arbre, 10-15 sept. 1990, Naturalia Monspeliensa, n° hors série A7, Montpellier, France, pp. 231-247.

[Françon, J., 1997a], « Un chercheur discret…dans un monde continu », un entretien électronique avec Jean Françon, publié dans GEDEON : revue de Géométrie Algorithmique : Dernières Nouvelles, n°29, 18 février 1997, pp. 1-6.

[Françon, J., 1997b], “Book review : The Algorithmic Beauty of Plants”, Plant Science 122 (1997), 109-110.

[Françon, J. et Lienhardt P., 1994], “Basic principles of topology-based methods for simulating metamorphosis of natural objects”, in Magnenat Thalmann N et Thalmann D (eds): Artificial life and virtual reality, Chichester, U. K., John Wiley and Sons, pp. 23-44.

[Françon, J. et Reveilles, J. P., 1990], « De l’imagerie à la géométrie discrète », [CTHS, 1992], pp. 323-339.

[Franquin, P., 1970], « Modèles mathématiques de structure chez les végétaux . I. Principes de structure et production de nombre », Cah. ORSTOM, série Biol., 1970, n°14, pp. 77-126.

[Franquin, P., 1972], « Modèles mathématiques de structure chez les végétaux . II. Relations de structure », Cah. ORSTOM, série Biol., 1972, n°17, pp. 3-21.

[Franquin, P., 1974], « Développement de la structure fondamentale ou développement morphogénétique de la plante », Cah. ORSTOM, série Biol., 1974, n°23, pp. 23-30.

[Godin, C. et Guédon, Y., 1997], « Représentation et analyse de l’architecture des plantes », in [INRA-Grignon, 1997], pp. 39-44.

[Godin, C., Guédon, Y., Costes, E., 1999], “Exploration of a plant architecture database with the AMAPmod software illustrated on an apple tree hybrid family“, Agronomie, vol. 19, n°3/4, pp. 163-184.

[Golomb, S., 1954], “Checkerboards and polyominoes”, Amer. Math. Monthly, vol. 61 (1954), pp. 675-682.

[Greene, N., 1989], “Voxel space automata : modelling with stochastic growth processes in voxel space”, Computer Graphics, vol. 23 (3), pp. 175-184.

[Hatta, H., Honda, H. et Fisher, J. B., 1999], « Branching Principles Governing the Architecture of *Cornus Kousa* (Cornaceae)”, Annals of Botany, 1999, vol. 84, pp. 183-199.

[Herman G. T. et Schiff, G. L., 1975], “Simulation of Multi-gradient Models of Organisms in the Context of L-Systems”, Journal of Theoretical Biology, 54, 1975, pp. 35-46.

[Herman, G. T., 2003], “Gabor T. Herman”, curriculum vitae et publications jusqu’en 2003, accessible à l’adresse http://www.cs.gc.cuny.edu/~gherman/.

[Honda, H., 1971], “Description of the form of trees by the parameters of the tree-like body : effects of the branching angle and the branch length on the shape of the tree-like body”, Journal of Theoretical Biology, 31, 1971, pp. 331-338.

[Honda, H., 1973], “Pattern Formation of the Coenobial Algae *Pediastrum biwae* Negoro”, Journal of Theoretical Biology, 1973, vol. 42, pp. 461-481.

[Honda, H., 1978], “Description of Cellular Patterns by Dirichlet Domains : The Two-Dimensional Case”, Journal of Theoretical Biology, 1978, vol. 72, pp. 523-543.

[Honda, H. et Eguchi, G., 1980], “How Much Does the Cell Boundary Contract in a Monolayered Cell Sheet ?”, Journal of Theoretical Biology, 1980, vol. 84, pp. 575-588.

[Honda, H. et Fisher, J. B., 1978], “Tree Branch Angle : Maximizing Effective Leaf Area”, Science, 24 February 1978, vol. 199, p. 888-890.

[Honda, H. et Fisher, J. B., 1979], “Ratio of tree branch lengths : The equitable distribution of leaf clusters on branches”, Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA, vol. 76, n°8, August 1979, Botany, pp. 3875-3879.

[Honda, H., Hatta, H. et Fisher, J. B., 1997], “Branch Geometry in *Cornus Kousa* (Cornaceae) : Computer Simulations”, American Journal of Botany, 1997, 84 (6), pp. 745-755.

[Honda, H., Tanemura, M. et Nagai, T., 2003], “A Three-Dimensional Vertex Dynamics Cell Model of Space-Filling Polyhedra Simulating Cell Behavior in a Cell Aggregate”, Journal of Theoretical Biology, fin 2003, à paraître.

[Honda, H., Tomlinson, P. B. et Fisher, J. B., 1981], “Computer Simulation of Branch Interaction and Regulation by Unequal Flow Rates in Botanical Trees”, American Journal of Botany, 1981, 68 (4), pp. 569-585.

[Honda, H., Tomlinson, P. B. et Fisher, J. B., 1982], “Two Geometrical Models of Branching of Botanical Trees”, Annals of Botany, 1982, vol. 49, pp. 1-11.

[Houllier, F., 1987], « Modélisation de la dynamique des peuplements forestiers. Relations entre objectifs, structures, données et méthodes », in Biologie et Economie, éd. par J. Demongeot et P. Malgrange, Dijon, Librairie de l’Université de Bourgogne, 1987, pp. 271-293.

[Houllier, F., 1995], « Dynamique des peuplements de forêt dense humide : dialogue entre écologues, expérimentateurs et modélisateurs », Revue d’Ecologie, 50.3, 1995, pp. 303-311.

[Houllier, F., Bouchon, J., Birot, Y., 1991], « Modélisation de la dynamique des peuplements forestiers : état et perspectives », Revue Forestière Française, vol. 43 (2), pp. 87-108.

[Houllier, F., Colin, F., Leban, J. M., 1993], “Modélisation de la croissance et de la qualité du bois de l’épicéa commun (*Picea abies* Karst) : implications pour l’observation et l’expérimentation, applications à la sylviculture et aux inventaires », in Les modèles de croissance forestière et leurs utilisations (Québec, 18-19 novembre 1993), Chhun-Huor Ung (Ed.), pp. 69-82.

[Houllier, F., Leban, J. M., Colin, F., 1995], “Linking growth modelling to timber quality assessment for Norway spruce”, For. Ecol. Manage., 74, pp. 91-102.

[Houllier, F., Leban, J. M., Colin, F., Nepveu, G., 1991], « Modélisation de la croissance des arbres et des peuplements et de la qualité des bois », 10ème Congrès Forestier Mondial, Paris, 17-26 sept. 1991, 8 p.

[Jaeger, M. et Reffye (de), Ph., 1992], “Basic concepts of computer simulation of plant growth”, J. Biosci. 17, pp. 275-291.

[Kang, M. Z., Reffye (de), Ph., Barczi, J. F. et Hu, B. G., 2003], “Fast Algorithm for Stochastic Tree Computation”, The 11th International Conference in Central Europe on Computer Graphics - Visualization and Computer Vision 2003, in cooperation with EUROGRAPHICS, Journal of WSCG (Winter School of Computer Graphics), vol. 11, n°1, 8p.

[Kurt, W., 1994], “Morphological models of plant growth : possibilities and ecological relevance”, Ecological modelling, 75/76, pp. 299-308.

[Kurth, W., 1995], “Stochastic sensitive growth grammars : A basis for morphological models of tree growth”, Colloque “L’arbre – Biologie et Développement”, Montpellier, 11-16 septembre 1995, 15 pages, accessible sur htttp://www.uni-forst.gwdg.de/~wkurth/

[Kurth, W., 1996], “Elemente einer Regelsprache zur dreidimensionalen Modellierung des Triebwachstums von Laubbäumen“, in Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten – Sektion Forstliche Biometrie und Informatik, G. Hempel (Hg), Tharandt/Grillenburg, 8. Tagung, 25-28 September 1995, Ljubljana, Biotechnische Fakultät, 1996, pp. 174-187, accessible sur htttp://www.uni-forst.gwdg.de/~wkurth/

[Kurth, W. et Sloboda, B., 2001], “Sensitive Growth Grammars Specifying Models of Forest Structure, Competition nd Plant-Herbivore Interaction”, Proc. of the IUFRO 4. 11 Congress “Forest Biometry, Modelling and Information Science”, Greenwich (UK), June 25-29, 2001, 15 pages, accessible sur htttp://www.uni-forst.gwdg.de/~wkurth/

[Kurth, W., 2002], “Spatial structure, sensitivity and comunication in rule-based models”, in Scales, Hierarchies and Emergent Properties in Ecological Models, Franz Hölker (ed.), Frankfurt am Main, Peter Lang, 2002, pp. 95-104.

[Lacalli, T. C. et Harrison, 1979], “Turing’s Conditions and the Analysis of Morphogenetic Models”, Journal of Theoretical Biology, 1979, vol. 76, pp. 419-436.

[Lecoustre, R. et Reffye (de), Ph., 1993], « AMAP, un modeleur de végétaux, un ensemble de logiciels de CAO/DAO à l’usage des professionnels de l’aménagement et des paysages », Revue horticole suisse, vol. 66, n°6/7, 1993, pp. 142-146.

[Legay, J. M., 1968], « Eléments d’une théorie générale de la croissance d’une population », Bulletin of Mathematical Biophysics, vol. 30, 1968, pp. 33-46.

[Legay, J. M., 1971], « Contribution à l’étude de la forme des plantes : discussion d’un modèle de ramification », Bulletin of Mathematical Biophysics, vol. 33, 1971 : 387

[Legay, J. M., 1987], « Modélisation et protection des plantes », intervention au colloque « Modélisation et protection des plantes », Séance du 22 septembre 1987, C. R. Acad. Agric. Fr., 73, pp. 7-18.

[Leopold, L. B., 1971], “Trees and Streams : The Efficiency of Branching Patterns”, Journal of Theoretical Biology, 31, 1971, pp. 339-354.

[Lindenmayer, A., 1964], “Lide Cycles as Hierachical Relations”, in [Gregg, J. R. et Harris, F. T. C., 1964], pp. 416-470.

[Lindenmayer, A., 1968], “Mathematical models for cellular interactions in development. I. Filaments with one-sided inputs”, Journal of Theoretical Biology, 18, pp. 280-299 ; “Mathematical models for cellular interactions in development. II. Simple and branchinf filaments with two-sided inputs”, Journal of Theoretical Biology, 18, pp. 300-315.

[Lindenmayer, A., 1971], “Developmental systems without cellular interactions, their languages and grammars”, Journal of Theoretical Biology, 30, pp. 455-484.

[Lindenmayer, A., 1973], “Cellular automata, formal languages and developmental systems”, in Logic, Methodology and Philosophy of Science IV, Proc. Of the 4th intern. Congress for Logic, Methodology and Philosophy of Science, Bucharest, 1971, ed. by P. Suppes, L. Henkin, A. Joja, G. R. C. Moisil, Amsterdam, North Holland Publishing Company, 1973, pp. 677-691.

[Lindenmayer, A., 1975], “Developmental algorithms for multicellular organisms : a survey of L-systems”, Journal of Theoretical Biology, 54, pp. 3-22.

[Lotodé, R., 1969], « Etude statistique d’une population de mirides », Café, Cacao, Thé, Vol. 13, n°3, juil.-sept. 1969, pp. 216-220.

[Lotodé, R., 1971], « Possibilités d’amélioration de l’expérimentation sur cacaoyers », Café, Cacao, Thé, Vol. 15, n°2, avril-juin 1971, pp. 91-103.

[Lotodé, R. et Jadin, P., 1981], « Calcul des besoins en engrais des cacaoyers », Café, Cacao, Thé, Vol. 25, n°1, janv.-mars 1981, pp. 3-24.

[Lück, H. B., 1975], “Elementary Behavioural Rules as a Foundation for Morphogenesis”, Journal of Theoretical Biology, vol. 54, pp. 23-34, 1975.

[Mandelbrot, B., 1978], “The fractal geometry of trees and other natural phenomena”, in Buffon Bicentenary Symposium on Geometrical Probability, Ed. R. Miles and J. Serra, Lecture Notes in Biomathematics, vol. 23, pp. 235-249, New-York, Springer, 1978.

[Marticou, H. et Muller, R., 1964], « Essai de mise au point d’une méthode d’expérimentaiton adaptée aux conditions de la cacaoyère camerounaise traditionnelle », Café, Cacao, Thé, Vol. 8, n°3, juillet-septembre 1964, pp. 173-202..

[Massaux, F., Tchiendji, C., Misse, C. et Decazy, B., 1976], « Etude du transport de pollen de cacaoyer par marquage au ^{32}P », Café, Cacao, Thé, Vol. 20, n°3, juil.-sept. 1976, pp. 163-172.

[Masson, J. P., 1987], « Un essai de résumé et quelques remarques d’un biométricien », synthèse du colloque « Modélisation et protection des plantes », Séance du 22 septembre 1987, C. R. Acad. Agric., Fr., 1987, 73, n°7, pp. 193-198.

[Meinhardt, H., 2004], “Phyllotaxis : Helical arrangement of leaves and staggered dots on shells – two corresponding patterns”, presentation des travaux de Hans Meinhardt accessible sur le site de l’auteur à l’adresse http://www.eb.tubingen.mpg.de/dept4/meinhardt/phyllo.html.

[Molenaar, H., Barthélémy, D., de Reffye, P., Meinesz, A. et Mialet, I., 2000], “Modeling architecture and growth patterns of *Posidonio oceanica*”, Aquatic Botany, 2000, vol. 66, pp. 85-99.

[Niklas, K. J., 1986], “Computer simulations of branching-patterns and their implications on the evolution of plants”, Lecture Notes on Mathematics in the Life Sciences, vol. 18, 1986, pp. 1-50.

[Niklas, K. J., 2000], “The Evolution of Plant Body Plans – A Biomechanical Perspective”, Annals of Botany, 2000, vol. 85, pp. 411-438.

[Nosenzo, R., Reffye (de), Ph., Blaise, F. et Le Dimet, F. X., 2001], in [CIRAD-INRA, 2001], pp. 145-172.

[Oppenheimer, P. E., 1986], “Real Time Design and Animation of Fractal Plants and Trees”, SIGGRAPH’86, Computer Graphics, vol. 20 (4), August 18-22, pp. 55-64.

[Ottorini, J. M., 1995], « Simulation et sylviculture du douglas », in [RFF, 1995, vol. 47], pp. 97-105.

[Parvais, J. P., Reffye (de), Ph. et Lucas, P., 1977], « Observations sur la pollinisation libre chez *Theobroma Cacao* : analyse mathématique des données et modélisation », Café, Cacao, Thé, Vol. 21, n°4, oct.-déc. 1977, pp. 253-262.

[Perttunen, J., Sievänen, R., Nikinmaa, E., Salminen, H., Saarenmaa, H. et Väkeva, J., 1996], “LIGNUM : A Tree Model Based on Simple Structural Units”, Annals of Botany, 77, 1996, pp. 87-98.

[Perttunen, J., Nikinmaa, E., Lechowicz, M.J, Sievänen, R. et Messier, C., 2001], “Application of the Functional-Structural Tree Model LIGNUM to Sugar Maple Saplings (*Acer saccharum* Marsh) growing in Forest Gaps”, Annals of Botany, 88, 2001, pp. 471-481.

[Prusinkiewicz, P., 1997], “Visual Models of Morphogenesis : A Guided Tour “, Calgary, 1997, disponible sur http://www.cpsc.ucalgary.ca/projects/bmv/vmm-deluxe/TableOfContents.html .

[Prusinkiewicz, P., 1998], “Modeling of spatial structure and development of plants : a review”, Scientia Horticulturae, 1998, vol. 74, pp. 113-149.

[Prusinkiewicz, P., 2003], “Modeling plant growth and development“, Current Opinion in Plant Biology, 2003, vol. 7, n°1, pp. 1-5.

[Prusinkiewicz, P., Lindenmayer, A. et Hanan J., 1988], “Developmental models of herbaceous plants for computer imagery purposes”, Computer Graphics, 22, pp. 141-150.

[Reffye (de), Ph., 1974a], « La recherche de l’optimum en amélioration des plantes et son application à une descendance F1 de *Coffea arabusta* », Café, Cacao, Thé, Vol. 18, n°3, pp. 167-178.

[Reffye (de), Ph., 1974b], « Le contrôle de la fructification et de ses anomalies chez les *Coffea arabica, robusta* et leurs hybrides ‘Arabusta’», Café, Cacao, Thé, Vol. 18, n°4, pp. 237-254.

[Reffye (de), Ph., 1975], Formulation mathématique des facteurs de la fertilité dans le genre *coffea*, Thèse de troisième cycle préparée avec M. Essad, soutenue à l’Université Paris-Sud Orsay, le 22 septembre 1975, devant les professeurs Demarly (président), Dattée et Kammacher.

[Reffye (de), Ph., 1976], « Modélisation et simulation de la verse du caféier, à l’aide de la théorie de la résistance des matériaux », Café, Cacao, Thé, Vol. 20, n°4, pp. 251-272.

[Reffye (de), Ph., 1981a], « Modèle mathématique aléatoire et simulation de la croissance et de l’architecture du caféier *Robusta*. 1ère partie. Etude du fonctionnement des méristèmes et de la croissance des axes végétatifs », Café, Cacao, Thé, Vol. 25, n°2, pp. 83-104.

[Reffye (de), Ph., 1981b], « Modèle mathématique aléatoire et simulation de la croissance et de l’architecture du caféier *Robusta*. 2ème partie. Etude de la mortalité des méristèmes plagiotropes », Café, Cacao, Thé, Vol. 25, n°3, pp. 219-230.

[Reffye (de), Ph., 1982], « Modèle mathématique aléatoire et simulation de la croissance et de l’architecture du caféier *Robusta*. 3ème partie. Etude de la ramification sylleptique des rameaux primaires et de la ramification proleptique des rameaux secondaires », Café, Cacao, Thé, Vol. 26, n°2, pp. 77-96.

[Reffye (de), Ph., 1983], « Modèle mathématique aléatoire et simulation de la croissance et de l’architecture du caféier *Robusta*. 4ème partie. Programmation sur micro-ordinateur du tracé en trois dimensions de l’architecture d’un arbre », Café, Cacao, Thé, Vol. 27, n°1, pp. 3-20.

[Reffye (de), Ph., 1998], « Résumé du Colloquium de Rocquencourt », résumé étendu de la conférence du mardi 10 mars 1998 prononcée à l’INRIA de Rocquencourt, une page, accessible sur le site de l’INRIA à l’adresse http://inria.fr/colloques/COLLOQUIUM980310-fra.html.

[Reffye (de), Ph., Barthélémy, D., Blaise, F., Fourcaud, T. et Houllier F., 1997], « Essai sur la simulation des relations fonctionnelles entre architecture aérienne, architecture caulinaire et croissance en épaisseur des axes chez les végétaux », Naturalia Monspeliensa, n°hors série, 1996 (sous presse en 01/96).

[Reffye (de), Ph., Blaise, F., 1993], « Modélisation de l’architecture des arbres. Applications forestières et paysagères », Revue Forestière Française, numéro spécial de 1993, vol. 45, « Informatique et foresterie », pp. 128-136.

[Reffye (de), Ph., Blaise, F., Chemouny, S., Jaffuel, S., Fourcaud, T., 1999], “Calibration of a hydraulic-based growth model of cotton plant”, Agronomie, vol. 19, n°3/4, pp. 265-280.

[Reffye (de), Ph., Blaise, F., Fourcaud, T., Houllier, F. et Barthélémy, D., 1997], « Un modèle écophysiologique de la crosisance et de l’architecture des arbres et de leurs interactions », in [INRA-Grignon, 1997], pp. 129-135.

[Reffye (de), Ph., Blaise, F., Guédon, Y., 1993], « Modélisation et simulation de l’architecture et de la croissance des plantes », Revue du Palais de la Découverte, n°209, juin 1993, pp. 23-48.

[Reffye (de), Ph., Dinouard, P. et Barthélémy, D., 1991], « Modélisation et simulation de l’architecture de l’orme du Japon *Zelkova serrata* (Thunb.) Makino *(Ulmaceae)* : la notion d’axe de référence ». In Edelin, C. (éd.) 2ème Colloque International sur l’Arbre, 10-15 sept 1990, Montpellier, Naturalia Monspeliensa, n° hors série A7, pp. 251-266.

[Reffye (de), Ph., Dinouard, P. et Jaeger, M., 1990], « Basic concepts of computer plants growth simulation », in NICOGRAPH’90 Computer Graphics : “Where do we go now that we’ve arrived ?”, Tokyo, pp. 219-234.

[Reffye (de), Ph., Edelin, C., Françon, J., Jaeger, M., Puech, C., 1988], “ Plants models faithful to botanical structure and development”, Computer Graphics, vol. 22, n°4, pp. 151-158.

[Reffye (de), Ph., Edelin, C., Jaeger, M., 1989], « Modélisation de la croissance des plantes », La Recherche, vol. 20, 1989, pp. 158-168.

[Reffye (de), Ph., Edelin, C., Jaeger, M. et Cabart, C., 1986], « Simulation de l'architecture des arbres », in C. R. Colloque international sur l'arbre, Montpellier, 9-14 sept. 1985, Naturalia Monspeliensa, n°hors série, pp. 223-240.

[Reffye (de), Ph., Elguero, E. et Costes, E., 1991], "Growth units construction in trees : a stochastic approach", Acta Biotheoretica, 39, pp. 325-342.

[Reffye (de), Ph. et Essad, S., 1973], « Sur l'existence possible d'une unité naturelle de longueur des chromosomes métaphasique de *Lolium perenne L.* : le module », note de MM. Philippe de Reffye et Sadi Essad présentée, sous la spécialité « Cytogénétique », à la séance du 9 mai 1973 de l'Académie des Sciences de Paris par M. Roger Gautheret, Compte-Rendu de l'Académie des Sciences de Paris, t. 276 (9 mai 1973), série D, pages 2661 à 2664.

[Reffye (de), Ph., Goursat, M., Quadrat, J. P. et Hu, B. G., 2003], "The dynamic equations of the tree morphogenesis GreenLab Model", Plant Growth Modeling and Applications, Hu B. G. and Jaeger, M. eds, Proc. of 2003' International Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and their Applications (PMA03)" held at Beijing, China, October 2003, 2003, Hardcover, pp. 108-116.

[Reffye (de), Ph., Houllier, F., Blaise, F., Barthélémy, D., Dauzat, J. et Auclair, D., 1995], "A model simulating above and below ground tree architecture with agrofrorestry applications", Agroforestry Systems, vol. 30, n°1-2, 1995, pp. 175-197.

[Reffye (de), Ph., Parvais, J. P., Coulibaly, N. et Gervais, A., 1980], « Etude de la pollinisation du cacaoyer à partir du trafic des insectes – Modèle mathématique et simulation », Café, Cacao, Thé, Vol. 24, n°2, avril-juin 1980, pp. 83-100.

[Reffye (de), Ph., Parvais, J. P. et Lucas, P., 1978], « Influence des aléas de la pollinisation sur les rendements du cacaoyer – Modèle mathématique et simulation », Café, Cacao, Thé, Vol. 22, n°4, oct.-déc. 1978, pp. 251-271.

[Reffye (de), Ph. et Snoeck, J., 1976], « Modèle mathématique de base pour l'étude et la simulation de la croissance et de l'architecture du *Coffea Robusta* », Café, Cacao, Thé, Vol. 20, n° 1, pp. 11-31.

[Reinhardt, D, Kuhlemeier, C., 2002], "Plant architecture", EMBO Reports (European Molecular Biology Organization), vol. 3, n°9, 2002, pp. 846-851.

[Reinhardt, D., Mandel, T. et Kuhlemeier, C., 2000], "Auxin regulates the Initiation and Radial Position of Plant Lateral Organs", The Plant Cell, vol. 12, 2000, pp. 507-518.

[Reinhardt, D., Wittwer, F., Mandel, T. et Kuhlmeier, C., 1998], "Localized Upregulation of a New Expansin Gene Predicts the Site of Leaf Formation in the Tomato Meristem", The Plant Cell, vol. 10, 1998, pp. 1427-1437.

[Rivals, P., 1965], « Essai sur la croissance des arbres et sur leurs systèmes de floraison », Journée d'agriculture tropicale et de botanique appliquée (J.A.T.B.A.), vol. XII (12) déc. 1965, pp. 665-686; vol. XIII (1-2-3), janv.-mars 1966, pp. 91-122, vol. XVI, janv.-fév. 1967, pp. 67-102.

[Room, P., 1997], "The Algorithmic Beauty of Plants", recension de [Prusinkiewicz, P. et Lindenmayer, A., 1990] parue dans Endeavour, 1997, vol. 21, n°1, p. 41.

[Rozenberg, G. et Lindenmayer, A., 1972], "Develomental systems and language", *abstract* ; fiche de présentation en 2 pages avec résumé et références complètes de l'article originellement publié dans Proc. of the 4th Annual ACM Symposium on Theory of Computing, Denver, Colorado, 1972, pp. 214-221 ; fiche accessible sur le site de l'ACM : http://portal.acm.org/citation.cfm.

[Sachs, T. et Novoplansky, A., 1995], "Tree form : Architectural models do not suffice", Israel Journal of Plant Sciences, 43, pp. 203-212.

[Silk, W. K. et Erickson, R. O., 1979], "Kinematics of Plant Growth", Journal of Theoretical Biology, 1979, vol. 76, pp. 481-501.

[Smith, A. R., 1984], "Plants, Fractals, and Formal Languages", Computer Graphics, vol. 18 (3), July 1984, pp. 1-10.

[Snoeck, D., 1991], « Simulation de la croissance de cinq cultivars *Coffea Arabica* L. par l'analyse des cimes », Café, Cacao, Thé, Vol. 35, n°3, juil.-sept. 1991, pp. 177-190.

[Snoeck, J. et Reffye (de), Ph., 1980], « Influence des engrais sur l'architecture et la croissance du caféier Robusta », Café, Cacao, Thé, Vol. 24, n°4, oct.-déc. 1980, pp. 259-266.

[Soler, C., Sillion, F., Blaise, F. et Reffye (de), Ph., 2001], "A physiological plant growth simulation engine based on accurate radiant energy transfer", Le Chesnay, rapport de recherche de l'INRIA, n°4116, février 2001, 32p., accessible à l'adresse http://w3imagis.imag.fr/Publications/2001/SSBD01/RR-4116.pdf.

[Tomassone, R., 1987], « Un essai de synthèse », synthèse du colloque « Modélisation et protection des plantes », Séance du 22 septembre 1987, C. R. Acad. Agric., Fr., 1987, 73, n°7, pp. 187-191.

[Treuil, J. P. et Mullon, C., 1996], « Expérimentation sur mondes artificiels : pour une réflexion méthodologique », in [CNRS, 1996], pp. 425-431.

[Turing, A., 1952], "The chemical basis of morphogenesis", Philosophical Transactions of the Royal Society, B, 237, pp. 37-72.

[Vanclay, J. K., 1995], "Growth models for tropical forests : a synthesis of models and methods", Forest Science, 41 (1)(1995), pp. 7-42.

[Weeks, C. L. et Comfort, J. C., 1983], "The Growth Process of Tropical Trees : A Simulation with Graphic Output", Proc. of the 1983 Winter Simulation Conference, IEEE, Roberts, S., Banks, J. and Schmeiser, B. eds, pp. 649-657.

[White, J., 1979], "The plant as a metapopulation", Ann. Rev. Ecol. Syst., 10, pp. 109-145.

[Yan, H. P., Barczi, J. F., Reffye (de), Ph., Hu, B. G., Jaeger, M. et Le Roux, J., 2002], “Fast algorithms of plant computation based on substructure instances”, Proc. of the 10th WSCG (Winter School of Computer Graphics), n°3, pp. 145-153.

[Yan, H. P., Reffye (de), Ph., Le Roux, J., Hu, B. G., 2003], “Study of Plant Growth Behaviors Simulated by the Functional-structural Plant Model --- GreenLab”, Plant Growth Modeling and Applications, Hu B. G. and Jaeger, M. eds, Proc. of 2003' International Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and their Applications (PMA03)" held at Beijing, China, October 2003, 2003, Hardcover, pp. 118-125.

[Zhan, Z. G., Reffye (de), Ph., Houllier, F. et Hu, B. G., 2003], “Fitting a Structural-Functional Model with Plant Architectural Data”, Plant Growth Modeling and Applications, Hu B. G. and Jaeger, M. eds, Proc. of 2003' International Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and their Applications (PMA03)" held at Beijing, China, October 2003, 2003, Hardcover, pp. 236-243.

[Zhao, X., Reffye (de), Ph., Barthélémy, D. et Hu, B. G., 2003], “Interactive Simulation of Plant Architecture Based on a Dual-Scale Automaton Model”, Plant Growth Modeling and Applications, Hu B. G. and Jaeger, M. eds, Proc. of 2003' International Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and their Applications (PMA03)" held at Beijing, China, October 2003, 2003, Hardcover, pp. 144-153.

Numéros spéciaux de Revues

[RFF, 1993, vol. 45], Revue Forestière Française, numéro spécial de 1993, vol. 45, « Informatique et foresterie ».

[RFF, 1995, vol. 47], Revue Forestière Française, numéro spécial de 1995, vol. 47, « Modélisation de la croissance des arbres forestiers et de la qualité des bois ».

[RETV, 1995, vol. 50], Revue d’Ecologie (Terre et Vie), vol. 50, n°3, 1995, numéro entièrement consacré à la modélisation des écosystèmes forestiers.

[La Recherche, 1998, 305], La Recherche, n°305, janvier 1998, numéro spécial sur « l’origine des formes ».

Revues ou périodiques systématiquement dépouillés

[Artificial Life, (numéro)], Proc. Of the (numéro)th International Conference on Artificial Life, Cambridge, MIT Press, parution à partir de 1989.

[Berkeley Symposium, (année), (numéro)], Proceedings of the (numéro)th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, ed. by Lucien Lecam and Jerzy Neyman, University of California, Berkeley.

[Bulletin of Mathematical Biophysics, (volume), (année)], a paru de 1939 à 1972.

[Café, Cacao, Thé, CD I], [Café, Cacao, Thé, CD II] ou « Titre de l’article » in [Café, Cacao, Thé, (volume), (numéro), (mois-mois+2 année)], Revue trimestrielle de l’IFCC de 1957 à 1994, Texte intégral sur 2 CD-ROM édités par le CIRAD et l’AUPELF-UREF, Consortium – Presse électronique. Cette revue est devenue Plantation, recherche, développement depuis 1995, sous administration du CIRAD.

[Ecological Modelling, (volume), (numéro), (année)], Ecological Modelling, revue fondée par S.E. Jorgensen, paraissant à partir de 1975.

[Journal of Theoretical Biology, (volume), (année)], paraissant depuis 1961.

[NSS, (année), (volume), (numéro)], Natures Sciences Sociétés, Paris, Elsevier, parution à partir de 1993.

[Simulation, (année), (mois)], Simulation, revue fondée par John Mac Leod, soutenue par la Society for Compter Simulation (SCS), La Jolla, Californie, existant depuis 1952, dépouillée depuis 1971 jusqu’en 2002. Elle devient la revue Modeling & Simulation à partir de janvier 2002.

[Modeling & Simulation, vol. (volume), n° (number), (month-month+2) year], publication, depuis janvier 2002, de la Society of Modeling and Simulation International, nouveau nom de la Society for Computer Simulation depuis janvier 2002.

Entretiens produits au titre d’archives orales (déposés aux archives du Musée des Arts et Métiers)

[Bichat, H. et Varenne, F., 2001], Entretien transcrit, 19p.

[Coléno, A. et Varenne, F., 2001], Entretien transcrit, 20p.

[Collot, F. et Varenne, F., 2004], Entretien transcrit, 19p.

[Françon, J. et Varenne, F., 2001], Entretien transcrit, 23p.

[Frankhauser, P. et Varenne, P., 2001], Entretien transcrit, 28p.

[Hallé, F. et Varenne, F., 2004], Entretien transcrit, 15p.

[Houllier, F. et Varenne, F., 2000], Entretien transcrit, 32p.

[Legay, J. M. et Varenne, F., 2001], Entretien transcrit, 21p.

[Reffye (de), Ph. et Varenne, F., 2001], Entretien transcrit, 46p.

[Pumain, D. et Varenne, F., 2002], Entretien transcrit, 26p.

Entretiens publiés et/ou accessibles sur Internet

[Bouchon, J. et Poupardin, D., 1995], Entretien avec Jean Bouchon mené le 21 juillet 1995 à Nancy par Denis Poupardin pour le compte des Archorales-INRA (Archives orales de l'INRA), 21 pages, accessible sur le site http://www.inra.fr/archorales/

[Bru, B., Colasse, B. et Pavé, F., 2002], « L'Institut Henri Poincaré, aux sources de la Recherche Opérationnelle – Entretien avec Bernard Bru mené par Bernard Colasse et Francis Pavé », Gérer et Comprendre, mars 2002, n°67, pp. 76-91.

[Cousin, R. et Poupardin, D., 1996], Entretien avec Roger Cousin mené le 22 mai et le 11 octobre 1996 à Versailles par Denis Poupardin pour le compte des Archorales-INRA (Archives orales de l'INRA), 13 pages, accessible sur le site http://www.inra.fr/archorales/

[Demarly, Y. et Poupardin, D., 1996], Entretien avec Yves Demarly mené le 18 juillet 1996 à Versailles par Denis Poupardin pour le compte des Archorales-INRA (Archives orales de l'INRA), 16 pages, accessible sur le site http://www.inra.fr/archorales/

[Guilbaud, G. TH., Colasse, B. et Pavé, F., 2002], « La mathématique et le social – Entretien avec Georges Th. Guilbaud mené par Bernard Colasse et Francis Pavé », Gérer et Comprendre, mars 2002, n°67, pp. 67-74.

Thèses

[Barthélémy, D., 1988], Architecture et sexualité chez quelques plantes tropicales : le concept de floraison automatique. Thèse Doct., physiologie, biologie des organismes et des populations, Montpellier, France, 262p.

[Blaise, F., 1991], Simulation du parallélisme dans la croissance des plantes et application. Nouvelle thèse n°1071 (spécialité informatique), Université Louis Pasteur, Strasbourg, France, 186p.

[Deleuze, Ch., 1996], Pour une dendrométrie fonctionnelle : essai sur l'intégration des connaissances écophysiologiques dans les modèles de production ligneuse. Thèse, Université Claude Bernard, Lyon I, France, 305p.

[Edelin, C., 1977], Images de l'architecture des conifères. Th. Doct. 3ème cycle en biologie végétale, Université Montpellier II, France, 255p.

[Jaeger, M., 1987], Représentation et simulation de croissance des végétaux. Nouvelle thèse n°1071 (spécialité informatique), Université Louis Pasteur, Strasbourg, France, 156p.

[Janay, N., 1992], Modélisation et synthèse d'images d'arbres et de bassins fluviaux associant méthodes combinatoires et plongement automatique d'arbres et cartes planaires, Université de Franche-Comté, spécialité : automatique et informatique, http://raphaello.univ-fcomte.fr/These/Default.htm, France.

[Oldeman, R. A. A., 1972], L'architecture de la forêt guyanaise. Th. Doct. Etat, Université de Montpellier II, France, 247p.

[Reffye (de), Ph., 1979] Modélisation de l'architecture des arbres par des processus stochastiques. Simulation spatiale des modèles tropicaux sous l'effet de la pesanteur. Application au *Coffea Robusta*. Th. Doct. Etat, Université Paris-Sud, Orsay, France, 195p.

[Vitanyi, P.M.B., 1978], Lindenmayer systems : structure, languages and growth functions, Ph. D. Thesis, Amsterdam, 1978, 211p.

III- Ouvrages et articles concernant la cybernétique, la théorie de l'information et les ordinateurs :

[Ashby, W. R., 1956, 1957, 1999], An Introduction to Cybernetics, London, Chapman & Hall Ltd, 1956 ; seconde impression : 1957, 295p. ; disponible intégralement depuis 1999 sur le site de "Principia Cybernetica Web" : http://pcp.vub.ac.be/books/IntroCyb.pdf.

[Bernad, J, Paker, M., 1980], Macroscopie de l'entreprise, Paris, Les éditions d'organisation, préface de Joël de Rosnay, 1980, 215p.

[Bresenham, J. E., 1965], "Algorithm for computer control of a digital plotter", IBM Systems Journal, 1965, vol. 4, n°1, pp. 25-30.

[Brillouin, L., 1959, 1988], La science et la théorie de l'information, Paris, Masson, 1959 ; réimpression : Paris, Editions Jacques Gabay, 1988, 302p.

[Cossa, P., 1955, 1957], La cybernétique – Du cerveau humain aux cerveaux artificiels, Paris, Masson, collection Evolution des sciences, 1ère édition : 1955 ; 2ème édition revue et corrigée : 1957, 102p.

[Couffignal, L., 1963], La cybernétique, Paris, PUF, QSJ, 1963, 128p.

[David, A., 1965], La cybernétique et l'humain, Paris, Gallimard, 1965, 185p.

[Delavenay, E., 1959], La machine à traduire, Paris, PUF, QSJ, 1959, 128p.

[Demarne, P. et Rouqueyrol, M., 1959, 1967], Les ordinateurs électroniques, 1ère édition : 1959, 4ème édition mise à jour : 1967, Paris, PUF, QSJ, 127p.

[Demarne, P. et Rouqueyrol, M., 1959, 1998], Les ordinateurs, 10ème édition mise à jour du livre précédent : 1998, Paris, PUF, QSJ, 126p.

[Dormy, E., 1996], « Introduction aux expériences numériques », Revue du Palais de la Découverte, février 1996, n°235, pp. 27-41.

[Font, J. M. et Quiniou, J. C., 1968], Les ordinateurs – mythes et réalités, Paris, Gallimard, Idées NRF, 1968, 187p.

[Greniewski, H., 1960, 1965], Cybernétique sans mathématiques, Varsovie, PWN - Editions scientifiques de Pologne, 1960 ; traduction : Paris, Gauthier-Villars, 1965, 131p.

[Idatte, P., 1969], Clefs pour la cybernétique, Paris, Seghers, 1969, 194p.

[Jolivalt, B., 1995], La simulation et ses techniques, Paris, PUF, QSJ, 1995, 127p.

[Latil (de), P., 1953], La pensée artificielle – Introduction à la cybernétique, Paris, Gallimard, coll. « L'avenir de la science », 1953, 332p.

[Lasker, G.E., 1980a], Applied Systems and Cybernetics – Vol. IV : Systems Research in Health Care, Biocybernetics and Ecology, Proc. of the Int. Congress on Applied Systems Research and Cybernetics, December 12-16, 1980, Acapulco, Mexico, ed. by G.E. Lasker, New York, Pergamon Press, 1980, xxx + 414p.

[Lasker, G.E., 1980b], Applied Systems and Cybernetics – Vol. V : Systems Approaches in Computer Science and Mathematics, Proc. of the Int. Congress on Applied Systems Research and Cybernetics, December 12-16, 1980, Acapulco, Mexico, ed. by G.E. Lasker, New York, Pergamon Press, 1980, xxxiii + 653p.

[McCulloch, W. S. and Pitts, W., 1943], "A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity", Bulletin of Mathematical Biophysics, 1943, vol. 5, pp. 115-133 ; traduction partielle in [Pélissier, A. et Tête, A., 1995], pp. 62-69.

[Mathelot, P., 1969], L'informatique, Paris, PUF, QSJ, 1969, 128p.

[Paris, E., 1984], « Un nouvel outil : la conception assistée par ordinateur », Revue du Palais de la Découverte, juillet-août-septembre 1984, pp. 37-45.

[Renard, B., 1960], Le calcul électronique, Paris, PUF, QSJ, 128p.

[Rose, J., 1978], Current Topics in Cybernetics and Systems, Proc. of the 4th Int. Congress of Cybernetics and Systems, August 21-25, 1978, Amsterdam, Netherlands, ed. by J. Rose, New York, Springer Verlag, 409p.

[Rosenblueth, A. and Wiener, N., 1945], "The role of models in science", Philosophy of Science, vol. 12, October 1945, n°4, 316-321.

[Rosnay (de), J., 1975, 1998], Le macroscope – Vers une vision globale, Paris, Seuil, 1ère édition : 1975, réimpression en poche : 1998, 351p.

[Stanley Jones, D. et K., 1960], The Kibernetics of natural systems, New York, Pergamon Press Ltd., 1960 ; traduction : La cybernétique des êtres vivants, Paris, Gauthier-Villars, 1962, 125p.

[Titli, A., 1979], Analyse et commande des systèmes complexes, Monographie AFCET, Division Automatique et Instrumentation, Toulouse, CEPADUES Editions, 237p.

[Wiener, N., 1948, 1961], Cybernetics, or Control and Communications in the Animal and the Machine, New York, John Wiley, 1961 (1ère edition : 1948).

[Wiener, N., 1950, 1952], Cybernetics and Society, 1950, traduction : Cybernétique et société, Paris, Deux Rives, 1952 ; réédition synoptique (avec les remaniements de la version anglaise de 1954) : Paris, 10/18, 1971, 511p.

IV- Ouvrages sur l'informatique, la recherche opérationnelle et la simulation

[Abunawass, A. M., 1992], "Biologically Based Machine Learning : An Introductory Course", ACM SIGCSE Bulletin, vol. 24, n°1, 1992, pp. 87-91.

[Agard, J *et al.*, 1968], Les méthodes de simulation, Paris, Dunod, Monographies de Recherche Opérationnelle de l'AFCET, 1968.

[Alj, A. et Faure, R., 1986], Guide de la Recherche Opérationnelle, Tome premier, Les fondements, Paris, Masson, 1965, 265p.

[Bartoli, N. et Del Moral, P., 2001], Simulation et algorithmes stochastiques, Toulouse, Cepadues-Editions, 218p.

[Berge, C., 1958], La théorie des graphes et ses applications, Paris, Dunod, 1958.

[Bertin, J., Ritout, M. et Rougier, J. C., 1967], l'exploitation partagée des calculateurs, Paris, Dunod, 1967, 198p.

[Boucher, H., 1960], Organisation et fonctionnement des machines arithmétiques, Paris, Masson, 1960, 427p.

[Chorafas, D. N., 1960], Traité des ordinateurs, Paris, Hermann, 1960, 398p.

[Chorafas, D. N., 1965], Systems and Simulation, New York, Academic Press, 1965.

[Chorafas, D. N., 1966], La simulation mathématique et ses applications, Paris, Dunod, 1966.

[Closkey, J.F.Mc et Trefethen, F.N., 1954, 1957], Operations Research for Management, Baltimore, The Johns Hopkins Press, 1954 ; traduction : Introduction à la recherche opérationnelle, Paris, Dunod, 1957, 206p.

[Evans, G. W., Wallace, G. F. and Sutherland, G. L., 1967], Simulation Using Digital Computers, Englewood Cliffs, N. J., Prentice-Hall, Inc., 1967.

[Evans, J. B., 1988], Structures of Discrete Event Simulation – An Introduction to the Engagement Strategy, New York, John Wiley and Sons, Ellis Horwood Books in Computer Science, 1988.

[Faure, R., 1979], La programmation linéaire appliquée, Paris, PUF, QSJ, 1979, 128p.

[Faure, R., Boss, J. P. et Le Garff, A., 1961, 1967], La recherche opérationnelle, Paris, PUF, QSJ, 1ère édition : 1961, 3ème édition : 1967, 128p.

[Feuvrier, C. V., 1971], La simulation des systèmes, Paris, Dunod, 1971, 152p.

[Gastinel, N., 1970], Procédures ALGOL en analyse numérique, ouvrage collectif édité par N. Gastinel, faisant suite à [Kuntzman, J., 1967], Paris, CNRS, 1970, 172p.

[Girault, M., 1959], Initiation aux processus aléatoires, Paris, Dunod, 1959, 107p.

[Holland, J. H., 1962], "Outline for a Logical Theory of Adaptive systems", Journal of the ACM, vol. 9, n°3, July 1962, pp. 297-314.

[Holland, J. H., 2001], "Genetic algorithms", texte d'une conférence prononcée à l'Université de Columbia (USA) en 2001, accessible à l'adresse : http://www.arch.columbia.edu/DDL/cad/A4513/S2001/r7/

[Hollingdale, S. H., 1967], Digital Simulation in Operational Research, a conference under the aegis of the Scientific Affaire Division of N.A.T.O., held in Hamburg, 6-10th, September 1965, The English University Pres Ltd, London, 392p.

[Johnson, J. H. et Loomes, M. J., 1991], The Mathematical Revolution Inspired by Computing, Proc. of a Conference organized by The Institute of Mathematics and its Applications and held at Brighton Polytechnic, in April 1989, Oxford, Clarendon Press, 1991.

[Kuntzman, J., 1967], Procédures ALGOL en analyse numérique, ouvrage collectif édité par J. Kuntzman, Paris, CNRS, 1967, 324p.

[McLeod, J., 1980a], "Verification, validation and transfer of societal models", Simulation, February 1980, pp. vii-x.

[McLeod, J., 1980b], "All about validation", Simulation, July 1980, pp. vii-x.

[McLeod, J., 1986], "Computer modeling and simulation : The changing challenge", Simulation, March 1986, pp. 114-118.

[Monsef, Y., 1997], Modeling and Simulation of Complex Systems – Concepts, Methods and Tools, San Diego, SCS Int., 1997, 296p.

[Naylor, T. H., Balintfy, J. L., Burdick, D. S. and Chu, K., 1966], Computer Simulation Techniques, New York, John Wiley and Sons, Inc., 1966, 352p.

[Nora, S. et Minc, A., 1978], L'informatisation de la société, Rapport remis au Président de la République + 4 volumes d'annexes numérotés de 1 à 4, Paris, La Documentation Française, 1978.

[Pritsker, A.A.B., 1979], "Compilation of definitions of simulation", Simulation, August 1979, pp. 61-63.

[Schruben, L.W., 1980], "Establishing the credibility of simulations", Simulation, March 1980, pp. 101-105.

[SCS Technical Committees, 1979], "Terminology for model credibility", Simulation, March 1979, pp. 103-104.

[Shannon, R. E., 1998], "Introduction to the Art and Science of Simulation", in Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference, D. J. Medeiros, E. F. Watson, J. S. Carson and M. S. Manivannan, eds., pp. 7-14.

[Trefethen, F. N., 1954], "A history of operations research", in [Closkey, J.F.Mc et Trefethen, F.N., 1954, 1957], pp. 3-35.

[Vermeersch, L. K. J. M., 1999], Neural Structure Characterization of Ill-defined Systems, San Diego, SCS Int., 1999, 254p.

V- Ouvrages de mathématiques

[Polya, G., 1945, 1957, 1990], How to solve it, Princeton University Press, 1945 ; second edition : 1957, avec une préface de Ian Stewart, London, Penguin Books, 1990, 253p.

[Ramis, E., Deschamps, et Odoux, J., 1976, 1988], Cours de mathématiques spéciales – Topologie et éléments d'analyse, Tome 3, Paris, 1976 ; seconde édition : 1988, 362p.

[Sache, A., 1974], La théorie des graphes, Paris, PUF, QSJ, 1974, 128p.

[Thom, R., 1972, 1977], Stabilité structurelle et morphogenèse, W. A. Benjamin Inc., 1972 ; deuxième édition revue et augmentée : Paris, InterEditions, 351p.

VI- Biométrie, génétique, statistiques et probabilités

[Aïvazian, S., Enukov, I. et Méchalkine, L., 1983, 1986], Eléments de modélisation et traitement primaire des données, Moscou, 1983 ; traduction française, éditions MIR, 1986, 389p.

[Bartlett, M. S., 1960], "Monte Carlo Studies in Ecology and Epidemiology", Proc. of the 4th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, vol. 4, University of California, 1960, pp. 39-55.

[Bartlett, M. S., 1965], "Multivariate Statistics", in [Waterman, T. H. and Morowitz, H. J., 1965], pp. 201-224.

[Benzécri, J. P., 1973], L'analyse des données I- La taxinomie, leçons sur l'analyse factorielle et la reconnaissance des formes et travaux du laboratoire de l'Université Paris VI, rédigés et publiés sous la dir. du Professeur J. P. Benzécri, Paris, Dunod, 1973.

[Blackith, R. E., 1965], "Morphometrics", in [Waterman, T. H. and Morowitz, H. J., 1965], pp. 225-249.

[Borel, E., 1950], Probabilité et statistique, Paris, PUF, QSJ, 1950, 128p.

[Brouaye, F., 1990], La modélisation des incertitudes (Probabilités – Signaux et communications – Statistiques), Paris, Eyrolles, Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France (« les Cours de l'Ecole Supérieure d'Electricité », n°8), 1990, 234p.

[Cox, D. R., 1958], Planning of Experiments, New-York, Wiley and Sons, 1958.

[Cox, D. R.,1962], Renewal theory, London, Chapman and Hall, U. K., 1962, 142p.

[Cox, D.R. et Lewis, P.A.W., 1966, 1969], The statistical Analysis of Series of Events, London, Methuen and Co. Ltd; traduction : L'analyse statistique des séries d'événements, Paris, Dunod, 1969, 271p.

[Dixon, J., 1960], "Some Statistical Uses of Large Computer", Proc. of the 4th Berkeley Symposium on Mathematical Statistic and Probability, vol. 4, University of California, 1960, pp. 197-209.

[Fisher, R. A., 1921a], "Studies in Crop Variation. I. An Examination of the Yield of Dressed Grain from Broadbalk", Journal of Agricultural Sciences, 1921, vol. 11, pp. 107-135.

[Fisher, R. A., 1921b], "Some Remarks of the Methods Formulated in a Recent Article on 'The Quantitative Analysis of Plant Growth'", Annals of Applied Biology, 1921, vol. 7, pp. 367-372.

[Fisher, R. A., 1922], "On the Mathematical Foundations of Theoretical Statistics", Philosophical Transactions of the Royal Society of London, A, 1922, vol. 222, pp. 309-368.

[Fisher, R. A., 1925], "Theory of Statistical Estimation", Proc. of the Cambridge Philosophical Society, 1925, vol. 22, pp. 700-725.

[Fisher, R. A., 1925, 1947], 1ère édition : 1925, Statistical Methods for Research Works, Edinburgh, Oliver and Boyd ; traduction de I. Bertrand : Les méthodes statistiques adaptées à la méthode scientifique, Paris, PUF, 1947.

[Fisher, R. A., 1926], "The Arrangement of Field Experiments", Journal of the Ministry of Agriculture of Great Britain, 1926, vol. 33, pp. 505-513.

[Fisher, R. A., 1930], "Inverse Probability", Proc. of the Cambridge Philosophical Society, 1930, vol. 26, pp. 528-535.

[Fisher, R. A., 1934], "Indeterminism and Natural Selection", Philosophy of Science, 1934, vol. 1, n°1, pp. 99-117.

[Fisher, R. A., 1948], "Biometry", Biometrics, 1948, vol. 4, pp. 217-219.

[Fisher, R. A., 1950], "Creative Aspects of Natural Law", The Eddington Memorial Lecture, Cambridge University Press, 1950, pp. 1-23.

[Fisher, R. A., 1959], "Mathematical Probability in the Natural Sciences", Technometrics, 1959, vol. 1, pp. 21-29.

[Fisher, R. A., 1962], "The Place of the Design of Experiments in the Logic of Scientific Inference", Colloques internationaux du CNRS, Paris, 1962, n°110, pp. 13-19.

[Gosset (*alias* 'Student'), W. S., 1908], "The probable error of a mean", Biometrika, 6, 1908, pp. 1-25.

[Harris, T. E., 1963, 1969], The theory of branching processes, vol. 119 de la série "Die Grundlehren der mathematischen Wissenschaften", Springer-Verlag, Berlin, 1963; traduction : Les processus de ramification, Paris, Dunod, 1969, 275p.

[Jolicœur, P., 1991], Introduction à la biométrie, Montréal-Paris, Décarie-Masson, 1991, 300p.

[Lagarde (de), J., 1983], Initiation à l'analyse des données, 3ème édition revue : 1995, Paris, Dunod, 163p.

[Laplace (de), P. S., 1814, 1986], Essai philosophique sur les probabilités, Paris, chez Mme Veuve Courcier, 1814 ; réédition : Paris, 1986, Christian Bourgois, 314p.

[Laurent, A. G., 1950, 1968], La méthode statistique dans l'industrie, Paris, QSJ, 1ère édition : 1950 ; 4ème édition revue : 1968, 128p.

[Leslie, P. H., 1945], "On the Use of Matrices in Certain Population Mathematics", Biometrika, vol. 33, part. 3, november 1945, pp. 183-245.

[Leslie, P. H., 1958], "A Stochastic Model for Studying the Properties of Certain Biological Systems by Numerical Methods", Biometrika, 45, 1958, pp. 16-31.

[Leslie, P. H. et Gower, J. C., 1958], "The Properties of a Stochastic Model for Two Competing Species", Biometrika, 45, 1958, pp. 316-330.

[Patten, B. C., 1959], "An Introduction to the Cybernetics of the Ecosystem : the Trophic-Dynamic Aspect", Ecology, 40, 1959, pp. 221-231.

[Pearson, K., 1892, 1937, 1949], The Grammar of Science, London, The Temple Press, 1892 ; réédition modifiée : London, J. M. Dent & Sons Ltd., 1937, reimpression : 1949, 357p.

[Schreider, E., 1960, 1967], La biométrie, Paris, PUF, QSJ, 1ère edition : 1960, 2ème edition : 1967, 128p.

[Teissier, G., 1937], Les lois quantitatives de la croissance, Paris, in Exposés de biométrie et de statistiques biologiques, 455, XI, rapport de l'Association des Physiologistes, 1937, 47p.

[Vessereau, A., 1947, 1992], La statistique, Paris, PUF, QSJ, 1ère édition : 1947 ; 18ème édition : 1992, 128p.

[Vessereau, A., 1947, 1960, 1988], Méthodes statistiques en biologie et agronomie, Paris, 1ère édition : 1947 ; deuxième édition : Paris, J. B. Baillière, 1960 ; réimpression : Paris, Lavoisier, 1988, 539p.

[Wright, S., 1931], "Evolution in Mendelian Populations", Genetics, 1931, vol. 16, pp. 97-159.

VII- Automates cellulaires et grammaires formelles appliquées à la morphogenèse et à la vie artificielle

[Adami, C., 1998], Introduction to Artificial Life, New York, Springer Verlag, collection Telos, 1998, 374p. et un CD-ROM.

[Boden, M. A., 1996], The philosophy of Artificial Life, ed. by Margaret A. Boden, Oxford University Pres, Oxford Readings in Philosophy, 1996, 405p.

[Burks, A. W., 1970], Essays on Cellular Automata, ed. by Arthur W. Burks, Urbana, University of Illinois Press, 1970, 375p.

[Emmeche, C., 1994], The Garden in the Machine, première édition en danois : 1991 ; traduction de Steven Sampson, Princeton, Princeton University Press, 1994, 199p.

[Fernandez Ostolaza, J., Moreno Bergareche, A., 1992, 1997], Vida artificial, Madrid, Eudema, 1992 ; traduction : La vie artificielle, Paris, Seuil, 1997, 151p.

[Heudin, J. C., 1994], La vie artificielle, Paris, Hermès, 1994, 267p.

[Langlois, A. et Phipps, M., 1997], Automates cellulaires – application à la simulation urbaine, Paris, Hermes, 1997, 197p.

[Langton, Ch. G., 1987], Artificial Life, Langton ed., Proceedings of an interdisciplinary workshop on the synthesis and simulation of living systems, sept. 1987, Los Alamos, New Mexico.

[Marshall, A. W., 1954], "An introductory note", 2nd Symposium on Monte-Carlo Methods, ed. Herbert A. Meyer, New-York, John Wiley, 1954, pp. 1-14.

[Metropolis, N. and Ulam, S., 1953], "A property of randomness of an arithmetical function", Amer. Math. Monthly, 60, 1953, pp. 252-253.

[Neumann (von), J., 1932a], "Proof of the quasi-ergodic theorems", N.A.S. Proc., 18, pp. 70-82 ; repinted in Collected Works, A. H .Taub (ed.), Volume II, Oxford, Pergamon Press, 1961, pp. 261-273.

[Neumann (von), J., 1932b], "Physical applications of the ergodic hypothesis", N.A.S. Proc., 18, pp. 263-266 ; repinted in Collected Works, A. H .Taub (ed.), Volume II, Oxford, Pergamon Press, 1961, pp. 274-277.

[Neumann (von), J., 1948, 1951, 1996], "The general and logical theory of automata", in Cerebral Mechanisms and Behaviour, Lloyd A. J. ed., New York, John Wiley and Sons, 1951 ; traduction par J. P. Auffrand : Théorie générale et logique des automates, Champ-Vallon, coll. Milieux, 1996.

[Neumann (von), J., 1958, 1996], The Computer and the Brain, 1958, sans lieu ; traduction : L'ordinateur et le cerveau, Paris, Champs-Flammarion, 1996, 129p.

[Neumann (von), J., 1966], Theory of self-reproducing automata, edited and completed by A. W. Burks, Urbana IL : University of Illinois Press.

[Pasta, J. R., and Ulam, S., 1959], "Heuristic numerical work in some problems of hydrodynamics", Math. Tables Aids Comput., 13, 1959, pp. 1-12.

[Schrandt, R. G. et Ulam, S., 1970], "On recursively defined geometrical objects and patterns of growth", in [Burks, A. W., 1970], pp. 232-243.

[Stein, P. R. et Ulam, S., 1964, 1970], "Nonlinear transformations studies on electronic computers", 1ère impression dans les Rozprawy Matematyczne, Institut de Mathématique de l'Académie Polonaise, Varsovie, 1964 ; traduit et réimprimé *in* [Burks, A. W., 1970], pp. 244-263.

[Ulam, S., 1951], "On the Monte-Carlo method", Proceedings of a Second Symposium on Large-Scale Digital Calculating Machinery, 1949, Harvard University Press, Cambridge, Mass., 1951, pp. 207-212.

[Ulam, S., 1952], "Random processes and transformations", Proceedings of the International Congress of Mathematicians, Cambridge, Mass., 1950, Amer. Math. Soc., Providence, R. I., 1952, pp. 264-275.

[Ulam, S., 1954], "Applications of Monte-Carlo methods to tactical games", Symposium on Monte-Carlo methods, University of Florida, 1954, New York, John Wiley and Sons, Inc. ; London, Chapman and Hall, Limited, 1956, p. 63.

[Ulam, S., 1957], "Infinite models in physics", Applied probability. Proceedings of Symposia in Applied Mathematics, Vol. VII, New York-Toronto-London, McGraw-Hill Book, Co., for the American Mathematical Society, Providence, R.I., 1957, pp. 87-95.

[Ulam, S., 1961], "Monte-Carlo calculations in problems of mathematical physics", Modern mathematics for the engineer : Second series, New York, McGraw-Hill, 1961, pp. 261-281.

[Ulam, S., 1962], "On some mathematical problems connected with patterns of growth of figures", Proceedings of Symposia in Applied Mathematics, 14, pp. 215-224, American Mathematical Society ; réédité dans [Burks, A. W., 1970], pp. 219-213.

[Ulam, S., 1966],"Patterns of growth of figure : Mathematical aspects", in G. Kepes, editor, Module, Proportion, Symmetry, Rhythm, pp. 64-74, New-York, Braziller, 1966.

[Ulam, S., 1976, 1991], Adventures of a Mathematician, Berkeley, University of California Press, 1976 ; réimpression augmentée d'une préface et d'une postface : 1991, 329p.

[Ulam, S., 1990], Analogies Between Analogies : the Mathematical Reports of S. M. Ulam and his Los Alamos Collaborators, Berkeley, University of California Press, 1990, 551p. ; accessible intégralement sur le site eScholarship Editions de University of California Press, http://ark.cdlib.org/ark:/13030/ft9g50091s/

[Walter, W. G., 1950], "An imitation of life", Scientific American, 182 (5), pp. 42-45.

[Walter, W. G., 1951], "A machine that learns", Scientific American, 51, pp. 60-63.

[Wolfram, S., 2002], A New Kind of Science, Champaign, USA, Wolfram Media Inc., 2002, 1280p.

VIII- Sources sur l'activité du CIRAD

[CIRAD, 1997], rapport d'activité du CIRAD : « Le Cirad en 1997 », Service des éditions du CIRAD, Délégation à l'information scientifique et technique, Svi-Publicep, Montpellier, Centre de Recherche de Montpellier – BP 5035 – 34032 Montpellier Cedex 1.

[CIRAD, CD, 1997], CD-ROM inclus dans le rapport de 1997.

[CIRAD, 1999], rapport d'activité du CIRAD : « Le Cirad en 1998 », Service des éditions du CIRAD, Délégation à l'information scientifique et technique, Svi-Publicep, Montpellier, Centre de Recherche de Montpellier – BP 5035 – 34032 Montpellier Cedex 1 ; également accessible sur internet au début de l'année 2000 par l'adresse http://www.cirad.fr/presentation/cirad99/c2/resu/am_5.htm.

[CIRAD, 1999], « Images de la recherche », Service des éditions du CIRAD, Délégation à l'information scientifique et technique, Svi-Publicep, Montpellier, Centre de Recherche de Montpellier – BP 5035 – 34032 Montpellier Cedex 1.

[Coste, R., 1958], « Perspectives ouvertes par les recherches agronomiques pour l'amélioration de la production caféière dans l'Union Française », Café, Cacao, Thé, vol. 2, n°2, mai-août 1958, pp. 59-67.

[INRA, architecte, 1998], page internet de l'INRA « les architectes du végétal », « nouvelles brèves » accessible début 2000 à l'adresse http://www.inra.fr/PRESSE/MARS98/nb2.htm.

[Juglas, J. J., 1957], « Préface », préface au premier numéro de la revue du service « Café-Cacao-Thé » de l'ORSTOM, Café, Cacao, Thé, vol. 1, n°1, janvier-avril 1957, pp. 3-4.

[Pavé, A. *et al*., 1996], Première revue externe de l'unité de modélisation des plantes, CIRAD, 1996, 53p.

[Reffye (de), Ph. *et al*., 1996], Document préparatoire à la revue externe de l'Unité de modélisation des plantes, CIRAD, Montpellier, 1996, 180p.

IX- Sur la modélisation en physique, chimie et ingénierie

[Bejan, A., 2000], Shape and Structure, from Engineering to Nature, Cambridge University Press, 2000, 324p.

[Boltzmann, L., 1895, 1902, 1987], Leçons sur la théorie des gaz, 1ère édition 1895 ; traduction de A. Gallotti, Paris, Gauthier-Villars, 1902 ; réimpression : Sceaux, Jacques Gabay, 1987, 280p.

[Boltzmann, L., 1897], « Über die Unentbehrlichkeit der Atomistik in der Naturwissenschaft», Annalen der Physik und Chemie, 1897, nouvelle série, vol. 60, p. 23, traduction de J. Ruthel,; republié dans Les atomes : une anthologie historique, édité par B. Bensaude-Vincent, Paris, Presses Pocket – Agora, 1991, pp. 241-259.

[Boltzmann, L., 1902], article « Model » de l'Encyclopaedia Britannica, 11ème édition, Londres, 1902, pp. 213-220.

[Borghi, R., Clavin, P., Linan, A., Pelce, P. et Sivanshinsky, G.I., 1985], Modélisation des phénomènes de combustion, Ecole d'été CEA-EDF-INRIA sur les problèmes non linéaires appliqués, Paris, Eyrolles, 204p.

[Broglie (de), L., 1967], « Les représentations concrètes en microphysique », in Logique et connaissance scientifique, collectif sous la dir. de Jean Piaget, Paris, Pléiade, 1967, pp. 706-725.

[Cadoz, C., 1994], Les réalités virtuelles, Paris, Flammarion, collection Dominos, 1994, 125p.

[Caseau, P., 1986], « Les modèles numériques et leur place dans la recherche-développement », Culture Technique, n°18, mars 1988, p. 126-130.

[Caseau, P., 1996, 2002], « Crise ou mutation de la simulation numérique », version française d'un article publié en anglais en 1996, communication personnelle dans sa version française remaniée (en 2002), 11 pages.

[CEA, Clefs, 2002-2003], Recherche et simulation, n° spécial de la revue CLEFS du CEA (Commissariat à l'Energie Atomique), Hiver 2002-2003, n°47, 108p.

[Diener, F. et Diener, M., 1989], « Les applications de l'analyse non standard », La Recherche, 1989, vol. 20, n°206, pp. 68-83.

[EDP, 1998], Modélisation mathématique et simulation numérique, compte-rendu des 3èmes Entretiens de la Physique des 17 et 18 septembre 1999, « échanges physique industrie n°4 », EDP, Les Ulis, 1999, 60p.

[Einstein, A., 1933, 1934], "On the Method of Theoretical Physics", conférence donnée à Oxford le 10 juin 1933 ; réimpression : Philosophy of Science, 1934, vol.1, n°2, pp. 163-169.

[ESS, 2001], Simulation in industry, Proc. of the 13th European Simulation Symposium, Marseille, October 18-20th, 2001, ed. by N. Giambiasi and C. Frydman, SCS Europe Bvba, Ghent, 2001, 984p.

[Fleury, V., 1998], Arbres de pierre – La croissance fractale de la matière, Paris, Flammarion, Nouvelle Bibliothèque Scientifique, 1998, 334p.

[Guyon, E., 1996, 1997], « Modélisation et expérimentation », in [Cohen-Tannoudji, 1996, 1997], pp. 101-126.

[Jensen, P., 2001], Entrer en matière, Paris, Seuil, coll. Science Ouverte, 2001, 264p.

[Jensen, P. et Blase, X., 2002], « Les matériaux virtuels », La Recherche, n°352, avril 2002, pp. 40-44.

[Lachnitt, J., 1963, 1978], La mécanique des fluides, Paris, PUF, QSJ, 1963 ; 3ème édition : 1978, 128p.

[Laszlo, P., 2002], L'architecture du vivant, Paris, Flammarion, 2002, 342p.

[Ljund, L., Glad, T., 1994], Modeling of Dynamic Systems, Englewood Cliffs, Prentice Hall Information and System Sciences Series, 1994, 361p.

[Rapaport, D. C., 1995], The Art of Molecular Dynamics Simulation, Cambridge, Cambridge University Press, 1995.

[Soustelle, M., 1990], Modélisation macroscopique des transformations physico-chimiques, Paris, Masson, 1990, 458p.

X- Sur la complexité et l'émergence dans les systèmes

[Jensen, H.J., 1998], Self-Organized Criticality. Emergent Complex Behavior in Physical and Biological Systems, Cambridge, Cambridge University Press, 1998, 153p.

[Johnson, S., 2001], Emergence, London, Penguin Books, 2001, 288p.

[Kaufman, S., 1995], At Home in the Universe. The Search for the Laws of Self-Organization and Complexity, Oxford, Oxford University Press, 1995, 321p.

[Weisbuch, G., 1989], La dynamique des systèmes complexes – Une introduction aux réseaux d'automates, Paris, InterEditions/CNRS, 1989, 212p.

XI- Sur la modélisation en sciences humaines

[Allen, P. M., 1997], Cities and Regions as Self-Organizing Systems, Amsterdam, Gordon and Breach Science Publishers, 1997, 275p.

[Amblard, F., 2003], Comprendre le fonctionnement de simulations sociales individus-centrées – Application à des modèles de dynamiques d'opinion, Thèse d'informatique, Université Blaise Pascal – Clermont II, 2003, 112p.

[Ballot, G. and Weisbuch, G., 2000], Applications of Simulation to Social Sciences, ed. by Gérard Ballot (Paris II) and Gérard Weisbuch (Santa Fe Institute), Paris, Hermes, 462p.

[Barbut, M., 1967], Mathématiques des sciences humaines I- Combinatoire et Algèbre, Paris, PUF, coll. Sup. – Section « Le psychologue », 1967, 246p.

[Barbut, M., 1968], Mathématiques des sciences humaines II- Nombres et Mesures, Paris, PUF, coll. Sup. – Section « Le psychologue », 1968, 289p

[Barthes, R., 1985], L'aventure sémiologique, Paris, Seuil, coll. Points, 1985, 363p.

[Bonneuil, N., 1997], Introduction à la modélisation démographique, Paris, Armand Colin, 1997, 128p.

[Charraud, N., 1997], Lacan et les mathématiques, Paris, Economica, coll. Anthropos, 1997, 110p.

[Chomsky, N., 1957], Syntactic Structures, La Haye, Mouton & Co ; traduction française : Structures syntaxiques, de M. Braudeau, Paris, Seuil, 1969.

[Chomsky, N., 1959, 1967, 2000], "A review of B. F. Skinner's Verbal Behavior", Language, 1959, vol. 35, n°1, pp. 26-58 ; réimprimé avec une nouvelle préface dans Readings in the Psychology of Language, ed. Leon A. Jakobovits and Murray S. Miron, Prentice-Hall, Inc., 1967, pp.142-143 ; accessible en 2000 à l'adresse internet suivante http://cogprints.ecs.soton.ac.uk/archive/00001148/00/chomsky.htm.

[Chomsky, N., 1965, 1971, 1975], Aspects of the Theory of Syntax, Cambridge, USA, MIT Press, 1965 ; traduction : Aspects de la théorie syntaxique, Paris, Seuil, coll. Travaux linguistiques, 1971 ; réimpression : 1975, 284p.

[Chomsky, N., 1977, 1980], Essays on Form and Interpretation, New York, Elsevier North-Holland Inc., 1977 ; traduction : Essais sur la forme et le sens, Paris, Seuil, coll. Travaux Linguistiques, 1980, 283p.

[Chomsky, N., 1968, 1976], Language and Mind, New York, Harcourt, Brace & World Inc., 1968 ; traduction : Le langage et la pensée, Paris, Petite bibliothèque Payot, 1976, 147p.

[Dauphiné, A., 1987], Modèles de simulation en géographie, Paris, Economica, 1987, 187p.

[Dauphiné, A., 1995], Chaos, fractales et dynamiques en géographie, Montpellier, GIP Reclus, 1995, 135p.
[Dauphiné, A., 2003], « Les réseaux urbains : un exemple d'application de la théorie des systèmes auto-organisés critiques », Annales de Géographie, n°631, juin 2003, pp. 227-342.
[Djindjian, F., 1991], Méthodes pour l'archéologie, Paris, Armand Colin, 1991, 405p.
[Dumouchel, P. et Dupuy, J. P., 1983], L'auto-organisation – De la physique à la politique, Colloque de Cerisy, Paris, Seuil, 1983, 562p.
[Dupuy, G., 1991], L'urbanisme des réseaux, Paris, Armand Colin, 1991, 198p.
[Dupuy, J. P., 1992], Introduction aux sciences sociales – Logique des phénomènes collectifs, Paris, Ellipses, 1992, 297p.
[Duverger, M., 1959, 1963], Méthodes des sciences sociales, 1ère édition : 1959, 3ème édition : 1963, Paris, PUF, « Thémis », 501p.
[Forrester, J. W., 1968, 1984], Principles of Systems, Wright Allen Press, Inc., 1968 ; traduction de P. Sylvestre-Baron : Principes des systèmes, Lyon, PUL, 1984 (3ème édition).
[Forrester, J. W., 1969, 1979], Urban Dynamics, Cambridge, MIT Press, 1969 ; traduction : Dynamique urbaine, Paris, Economica, 1979, 329p.
[Frankhauser, P., 1994], La fractalité des structures urbaines, Paris, Anthropos – Economica, 1994, 291p.
[Georgescu-Roegen, N., 1979, 1995], La décroissance - Entropie – Ecologie –Economie, 1ère édition de ce recueil d'article conçue par J. Grinevald et I. Rens : Lausanne, Editions Pierre-Marcel Favre, 1979 ; réédition remaniée : Paris, Editions Sang de la terre, 1995, 254p.
[Gilbert, N., 1995], "Simulation : an emergent perspective", disponible sur la page web du CRESS : Centre for Research on Simulation in the Social Sciences, at the Department of Sociology, University of Surrey, Guildford, UK.
[Gilbert, N. et Troitzsch, K.G., 1999], Simulation for the social scientist, Buckingham and Philadelphia, Open University Press, 1999, 273p.
[Granger, G. G., 1990], « Epistémologie économique », in Encyclopédie économique, Tome I, éditée par X. Greffe, J. Mairesse et J. L. Reiffers, Paris, Economica, 1990, pp. 3-24.
[Grenier, J. Y., Grignon, C. et Menger, P. M., 2001], Le modèle et le récit, collectif issu d'un séminaire qui s'est tenu de 1995 à 1999, Paris, Editions de la Maison des sciences de l'homme, 2001, 502p.
[Guillaume, M., 1971], Modèles économiques, Paris, PUF, 1971, 313p.
[Guitton, H., 1987], « La modélisation en économie », in Biologie et Economie, éd. par J. Demongeot et P. Malgrange, Dijon, Librairie de l'Université de Bourgogne, 1987, pp. 23-28.
[Haggett, P., 1965, 1968, 1973], Locational Analysis in Human Geography, 1ère édition : Edward Arnold Ltd, 1965 ; 4ème édition :1968 ; traduction de la 4ème édition par Hubert Fréchou : L'analyse spatiale en géographie humaine, 1973, Paris, Armand Colin, 390p.
[Haken, H., 1977, 1978], Synergetics : An introduction, Berlin, Springer Verlag, 1977 : 1ère édition ; 1978 : 2ème édition augmentée, 355p.
[Jacques, F., 1989, 1995], « La pragmatique », article de l'Encyclopaedia Universalis, version de 1989 sur CD-ROM : 1995.
[Jakobson, R., 1963], Essais de linguistique générale, Paris, Editions de Minuit, 1963, 260p.
[Jakobson, R. et Halle, M., 1956, 1963], "Phonology and Phonetics", première partie des Fundamentals of Language, La Haye, 1956 ; modifié et traduit : « Phonologie et phonétique », in [Jakobson, R., 1963], pp. 103-149.
[Jallais, S., 2001], Mathématiques des modèles dynamiques pour économistes, Paris, La Découverte & Syros, 2001, 126p.
[Kaufman, A., Faure, R. et Le Garff, A., 1960, 1976], Les jeux d'entreprises, 1ère édition : 1960, 4ème édition corrigée : 1976, Paris, PUF, QSJ, 128p.
[Laborit, H., 1971, 1994], L'homme et la ville, Paris, Flammarion, 1971; Champs - Flammarion, 1994, 217p.
[Lavendhomme, R., 2001], Lieux du sujet – Psychanalyse et mathématique, Paris, Seuil, Champ Freudien, 2001, 364p.
[Lebovici, S., 2002], Le bébé, le psychanalyste et la métaphore, Paris, Odile Jacob, 2002, 257p.
[Le Bras, H., 2000], Essai de géométrie sociale, Paris, Odile Jacob, 2000, 301p.
[Lepetit, B. et Pumain, D., 1993, 1999], Temporalités urbaines, Paris, Anthropos - Economica, 1993, réimpression : 1999, 321p.
[Lévi-Strauss, C., 1958, 1974], Anthropologie structurale, Paris, Plon (1958) ; spécialement le chap. XV : « la notion de structure en ethnologie », 1974, pp. 303-351.
[Lévi-Strauss, C., 1962, 1985], La pensée sauvage, Paris, Plon (1962) ; Agora (1985), 351p.
[Lévy, J. et Lussault, M., 2000], Logiques de l'espace, esprit des lieux, Colloque de Cerisy édité par J. Lévy et M. Lussault, Paris, Belin, 2000, 352p.
[Maillet, P., 1971], L'économétrie, Paris, PUF, QSJ, 1971, 128p.
[Malinvaud, E., 1991], Voies de la recherche macroéconomique, Paris, 1991, 507p.
[Martinet, A., 1960], Eléments de linguistique générale, Paris, Armand Colin, 1960, 224p.
[Milner, J. C., 2002], Le périple structural – Figures et paradigme, Paris, Seuil, 2002, 248p.

[Mongin, P., 2001], « La théorie économique a-t-elle besoin des mathématiques ? », Commentaire, n°93, printemps 2001, pp. 129-140.

[Mooney, C. Z., 1997], Monte-Carlo Simulation, Series : Quantitative Applications in the Social Sciences, Thousand Oaks – London – New Delhi, Sage University Paper, 1997, 103p.

[Noth, M., Borning, A. et Waddell, P., 2002], "An extensible, modular architecture for simulating urban development, transportation, and environmental impacts", à paraître dans Computers, Environment and Urban Systems, 2002, 23 pages.

[Peterfalvi, J. M., 1970], Introduction à la psycholinguistique, Paris, PUF, coll. SUP, 1970, 160p.

[Piattelli-Palmarini, M., 1975, 1979], Théories du langage – Théories de l'apprentissage - Le débat entre Jean Piaget et Noam Chomsky, Actes du colloque de 1975 ; Paris, Seuil, coll. Points, 1979, 541p.

[Pressat, R., 1981], Les méthodes en démographie, Paris, PUF, QSJ, 1981, 128p.

[Propp, V., 1928, 1969, 1970], Morphologie du conte, 1ère édition en russe : 1928, 2ème édition en russe : 1969, traduction : Paris, Seuil, 1970, 255p.

[Pumain, D., 1982a], La dynamique des villes, Paris, Economica, 1982, 231p.

[Pumain, D., 1986], « Analogie entre les modalités d'évolution des systèmes urbains et celles des systèmes hiérarchiques ouverts », in [Wolkowski, Z. W., 1986], pp. 319-346.

[Pumain, D., 1989], Villes et auto-organisation, Paris, Economica, 1989, 191p.

[Pumain, D., 1998b], « Les modèles d'auto-organisation et le changement urbain », Cahiers de Géogaphie du Québec, Vol. 42, n°117, décembre 1998, pp. 349-366.

[Pumain, D., 2003], « L'émergence des villes », Pour la science, n°314, décembre 2003, pp. 134-138

[Pumain, D. et Robic, M. C., 2002], « Le rôle des mathématiques dans une "révolution" théorique et quantitative : la géographie française depuis les années 1970 », in [RHSH, 6, 200], pp. 123-144.

[RHSH, 6, 2002], Mathématiques et sciences sociales au cours du 20ème siècle, n°6 de la Revue d'Histoire des Sciences Humaines, Presses universitaires du Septentrion, 6, 2002, 225p.

[Sanders, L., 1992], Système de villes et synergétiques, Paris, Anthropos-Economica, 1992, 274p.

[Sanders, L., 2001], Modèles en analyse spatiale, collectif sous la direction de Léna Sanders, Paris, Hermès-Lavoisier, 2001, 333p.

[Sapir, E., 1949, 1967], Anthropologie 1- Culture et personnalité, Paris, Editions de Minuit, 1967, 209p, livre formé à partir d'articles extraits par Christian Baudelot des Selected Writings of Edward Sapir in Language, Culture and Personality, eux-mêmes collectés par David Mandelbaum, University Press of California, 1949.

[Schmidt, B., 2000], The Modeling of Human Behaviour, Ghent, SCS Int., 2000, 98p.

[Silva, E.A. et Clarke, K.C., 2002], "Calibration of the SLEUTH urban growth model for Lisbon and Porto, Portugal", in Computers, Environment and Urban Systems, 26, 2002, pp. 525-552.

[Sperber, D., 1968, 1973], Qu'est-ce que le structuralisme ? 3. Le structuralisme en anthropologie ? Paris, Seuil, 1968 ; Points-Seuil, 1973, 125p.

[Véron, J., 2002], « L'homme dénombré : arithmétique des populations », », Université de tous les savoirs – La géographie et le démographie – vol. 1, Paris, Poches Odile Jacob, 2002, pp. 31-48.

[Walliser, B., 1985], Anticipations, équilibres et rationalité économique, Paris, Calmann-Lévy, 1985, 252p.

[Walliser, B., 2000], L'économie cognitive, Paris, Odile Jacob, 2000, 258p.

XII- Sciences cognitives, intelligence artificielle, programmation orientée objet et systèmes multi-agents

[Andler, D., 1992], Introduction aux sciences cognitives, collectif sous la dir. de Daniel Andler, Paris, Gallimard, Folio-Essais, 514p.

[Bonabeau, E. et Theraulaz, G., 1994], Intelligence collective, sous la direction d'Eric Bonabeau et Guy Theraulaz, Paris, Hermès, 1994, 288p.

[Booch, G., Rumbaugh, J. et Jacobson, I., 1998, 2001], The Unified Modeling Language User Guide, The Addison-Wesley Object Technology Series, Addison-Wesley, 1998; traduction : Le guide de l'utilisateur UML, deuxième tirage en 2001, Paris, Eyrolles, 534p.

[Buser, P. et Lestienne, R., 2001], Cerveau Information Connaissance, Paris, CNRS Editions, 2001,227p.

[Changeux, J. P. et Connes, A., 1989, 1992], Matière à pensée, Paris, Odile Jacob, 1989 ; réimpression : Points-Odile Jacob, 1992, 267p.

[Churchland, P. S. et Sejnowski, T. J., 1992], The Computational Brain, Cambridge, Massachusetts, MIT Press, 1992, 544p.

[Clark, A., 1997, 2001], Being There – Putting Brain, Body and World Together Again, Cambridge, MIT Press, 1997 ; 5ème édition : 2001, 269p.

[Dahl, O. J. et Nygaard, K., 1966], "SIMULA – an ALGOL-based Simulation Language", Communications of the ACM, vol. 9, n°9, September 1966, pp. 671-678.

[Delahaye, J. P., 2002], L'intelligence et le calcul, Paris, Belin-Pour la science, 2002, 192p.

[Drogoul, A., 2002a], « La programmation orientée objet », cours de DEA d'Alexis Drogoul, Université Paris 6, accessible sur http://miriad.lip6.fr/~drogoul/cours/gla/OODesign.GLA.pdf, 143 transparents.

[Drogoul, A., 2002b], « L'intelligence artificielle distribuée », cours d'Alexis Drogoul, DESS d'IA de l'Université Paris 6, accessible sur http://miriad.lip6.fr/~drogoul/cours/ia/IA_SMA.pdf, 44 transparents.

[Erceau, J. et Ferber, J., 1991], « L'intelligence artificielle distribuée », La recherche, n°233, juin 1991, pp. 750-758.

[Ferber, J., 1995], Les systèmes multi-agents – Vers une intelligence collective, Paris, InterEditions, 1995, 1997 nouvelle présentation, 522p.

[Fodor, J., 2000, 2003], The Mind doesn't Work that Way, MIT Press, 2000 ; traduction : L'esprit, ça ne marche pas comme ça, Paris, Odile Jacob, 2003, 213p.

[Jeannerod, M., 2002a], La nature de l'esprit, Paris, Odile Jacob, 2002, 257p.

[Jeannerod, M., 2002b], Le cerveau intime, Paris, Odile Jacob, 2002, 219p.

[Mandiau, R., Grislin-Le Strugeon, E. et Péninou, A., 2002], Organisation et applications des SMA, Paris, Hermès-Lavoisier, 2002, 365p.

[Matthieu, P. et Müller, J. P., 2002], Systèmes multi-agents et systèmes complexes, Actes des 10èmes Journées Francophone pour l'Intelligence Artificielle Distribuée et les Systèmes Multi-Agents (JFIADSMA'02) qui se sont tenues à Lille en 2002 ; Paris, Hermès-Lavoisier, 2002, 266p.

[Nygaard, K. et Dahl, O. J., 1978], "The Developement of the Simula Languages", AGM SIGPLAN Notices, ACM, vol. 13, n°8, August 1978, pp. 245-272.

[Pélissier, A. et Tête, A., 1995], Sciences cognitives – Textes fondateurs (1943-1950), Rassemblés et traduits par A. Pélissier, présentés et annotés par A. Tête, Paris, PUF, coll. Psychologie et sciences de la pensée, 1995, 313p.

[Pinker, S., 1997, 2000], How the Mind Works, W. W. Norton & Company (sans lieu), 1997 ; traduction : Comment fonctionne l'esprit ?, Paris, Odile Jacob, 2000, 680p.

[Pratt, V., 1987, 1995], Thinking Machines. The Evolution of Artificial Intelligence, Basil Blackwell, New York, 1987, traduction : Machines à penser. Une histoire de l'intelligence artificielle, Paris, PUF, coll. Sciences Modernités Philosophies, 1995, 299p.

[Rochebrune, 2003], Le statut épistémologique de la simulation, Actes des 10èmes journées de Rochebrune : rencontres interdisciplinaires sur les systèmes complexes naturels et artificiels, 26 janvier - 3 février 2003, Paris, Editions de l'Ecole Nationale Supérieure de Télécommunications de Paris (ENST), 2003, 313p.

[Samuelides, M., 1999], « Les réseaux neuronaux, une voie parallèle de l'intelligence artificielle », L'armement, n°67, septembre 1999, pp. 109-117.

[Saurel, P., 1998], Nécessité des modèles en sciences cognitives : de la modélisation à la mise en parangon, Thèse soutenue à l'EHESS, 1998, 381p.

[Vignaux, G., 1991, 1994], Les sciences cognitives – Une introduction, Paris, La Découverte, 1991 ; réimpression : Livre de Poche, 1994, 351p.

[Vignaux, G., 2003], Du signe au virtuel – Les nouveaux chemins de l'intelligence, Paris, Seuil, 2003, 221p.

XIII- Ouvrages concernant la calculabilité

[Davies, P., 1992], The Mind of God, New-York, Simon & Schuster, 1992. Traduction de Paul Couturiau : L'esprit de Dieu, Paris, éditions du rocher, 1995, réédité dans la collection Pluriel-Hachette littératures, 1998. Cf. particulièrement les chapitres 4 : « mathématiques et réalité » et 5 : « mondes réels et mondes virtuels ».

[Hofstadter, D., 1979], Gödel, Escher, Bach : an Eternal Golden Braid ; traduction : Gödel, Escher, Bach : les Brins d'une Guirlande Eternelle, Paris, InterEditions/Masson, 1985. Cf. particulièrement chapitre XVII.

[Ladrière, J., 1957, 1992], Les limitations internes des formalismes, Louvain, Nauwelaerts Editeur et Paris, Gauthier-Villars Editeur, 1957 ; réimpression : Sceaux, Jacques Gabay, fac-similé, 714p.

[Nagel, E. *et al.,* 1958, 1989, 1997], Gödel's proof, New York University Press, 1958 ; traduction : Le théorème de Gödel, Paris, Seuil, 1989 ; réimpression : Points-Seuil, 1997, 184p.

[Simon, J. C., 1998], « La reconnaissance des formes à l'épreuve des faits », in La Recherche, n°312, septembre 1998, reproduit sur le site Internet http://www.larecherche.fr .

[Turing, A. M. et Girard, J. Y., 1995], La machine de Turing, Paris, Seuil, 1995 : un recueil d'articles de Turing, traduits par J. Basch et P. Blanchard et commentés par J. Y. Girard. On y trouve notamment l'article de 1936: "On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem".

XIV- Ouvrages concernant le chaos

[Bergé, P., Pomeau, Y, Vidal, Ch., 1984, 1988], L'ordre dans le chaos, Paris, Hermann, préf. de David Ruelle, 1984 ; 2ème édition corrigée : 1988, 353p.

[Bergé, P., Pomeau, Y, Dubois-Gance, M., 1994], Des rythmes au chaos, Paris, Odile Jacob, 294p.

[Dahan-Dalmedico, A. *et al.*, 1992], Chaos et déterminisme, Paris, Seuil, 1992, 416p.

[Ekeland, I., 1984], Le calcul, l'imprévu – Les figures du temps de Képler à Thom, Paris, Seuil, 1984, 169p.

[Ekeland, I., 1991], Au hasard, Paris, Seuil, 201p.

[Ekeland, I., 1995], Le chaos, Paris, Flammarion, « domino », 1995, 123p.

[Gleick, J., 1989], Chaos, New York, Viking Press, 1ère édition : 1987 ; traduction : La théorie du chaos, Paris, Albin Michel, 1989, 431p.

[La recherche, mai, 1991], La science du désordre, numéro spécial de La recherche, n°232, mai 1991.

[Petersons, I., 1995], Le chaos dans le système solaire, trad. Française : Paris, Belin – Pour la science, 1995, 288p.

[Robert, R., 2001], « L'effet papillon n'existe plus ! », Pour la science, mai 2001, pp. 28-35.

[Ruelle, D., 1991], Hasard et chaos, Paris, Odile Jacob, 1991, 245p.

[Stewart, I., 1997], Does God play Dice ? The new mathematics of chaos, Londres, Penguin Books, 1989, 1997: 2ème édition ; traduction : Dieu joue-t-il aux dés ?, Paris, Flammarion, 1992 et 1998, préface de B. Mandelbrot, 599p.

XV- Ouvrages sur la modélisation mathématique, toutes disciplines confondues

[Bender, E. A., 1978, 2000], An Introduction to Mathematical Modeling, New York, Wiley, 1978 ; réimpression : New York, Dover Publications Inc., 2000, 256p.

[Bruter, C. P., 1982], Les architectures du feu – Considérations sur les modèles, Paris, Flammarion, Nouvelle bibliothèque scientifique, 1982, 235p.

[Bruter, C. P., 1993], Modèles et transformations – La biologie théorique de Pierre Delattre, Actes des journées Pierre Delattre, Collège de France, 4 et 5 décembre 1987, coordonnés par C. P. Bruter, Paris, Polytechnica, 1993, 148p.

[CNRS Info, 2000], CNRS Info, n° spécial de la revue sur les mathématiques, mai 2000.

[Le Moigne, J. L., 1990, 1999], La modélisation des systèmes complexes, Paris, Bordas, 1990 ; Dunod, 1999, 178p.

[Le Moigne, J. L., 1995, 1999], Les épistémologies constructivistes, Paris, PUF, QSJ, 1995 ; 2nde édition : 1999, 127p.

[Lesourne, J., 1980], La notion de système dans les sciences contemporaines, Actes du colloque CNRS - Analyse de Système – Lyon 1980, dir. par J. Lesourne, 2 tomes, Aix-en-Provence, Librairie de l'Université, Tome 1 : Méthodologies, 533p., Tome 2 : Epistémologie, 317p.

[Lichnerowicz, A., Perroux, F. et Gadoffre, G., 1981], Analogie et connaissance – Tome II : de la poésie à la science, Paris, Maloine, coll. Recherches Interdisciplinaires, 1981, 270p.

[Simon, H. A., 1969, 1991], The Sciences of the Artificial, Cambridge, MIT Press, 1969, 2nd edition : 1981; traduction de la seconde édition complétée par J. L. Le Moigne : Sciences des systèmes – Sciences de l'artificiel, Paris, Dunod, 1991, 229p.

B – SOURCES SECONDAIRES

I- Histoire, histoire des sciences et des techniques

[Abir-Am, P., 1987], "The Biotheoretical Gathering, Transdisciplinary Authority and the Incipient Legitimation of Molecular Biology in the 1930's : New Perspective on the Historical Sociology of Science", History of Science, 1987, vol. 25, pp. 1-70.

[Acot, P., 1987], « L'idéologie organiciste dans l'histoire récente de l'écologie (1905-1942) », Cahiers d'Histoire et de Philosophie des Sciences, nouvelle série, n°22, 1987, pp. 73-85.

[Acot, P., 1988], Histoire de l'écologie, Paris, PUF, 1988, 285p.

[Acot, P., 1999], L'histoire des sciences, Paris, PUF, QSJ, 1999, 128p.

[Adler, I., Barabe, D. et Jean, R. V., 1997], "A History of the Study of Phyllotaxis", Annals of Botany, 1997, vol. 80, pp. 231-244.

[Apter, M. J., 1977, 1997], “An Introduction to Reversal Theory”, in It’s a Funny Thing Humour, ed. by Anthony J. Chapman and Hugh C. Foot, Oxford - New York, Pergamon Press, 1977, sans numéros de pages ; accessible à l’adresse suivante : http://www.reversaltheory.org/rtabout.htm.

[Atten, M. et Pestre, D., 2002], Heinrich Hertz – L’administration de la preuve, Paris, PUF, coll. Philosophies, 2002, 127p.

[Auzias, J. M., 1967, 1968], Clefs pour le structuralisme, Paris, Seghers, 1967 ; 2ème édition : 1968, 191p.

[Bac, C., 1985-2003], Le langage C, notes d’un cours de Christian Bac, professé à l’Institut National des Télécommunications (INT), accessible sur http://www.framasoft.net/IMG/pdf/langage_c.pdf, 238p.

[Barberousse, A., 2002], La mécanique statistique – De Clausius à Gibbs, Paris, Belin, 240p.

[Beltran, A. et Griset, P., 1990], Histoire des techniques aux XIXème et XXème siècles, Paris, Armand Colin, 1990.

[Benkirane, R., 2002], La complexité, vertiges et promesses – 18 histoires de sciences, Paris, Le Pommier, 420p.

[Bensene, R., 2002], “Monroe 920 Desktop Calculator”, 4 pages de documents accessibles à l’adresse suivante : http://www.oldcalculatormuseum.com/monroe920.html.

[Benzécri, J. P., 1982], Histoire et préhistoire de l’analyse des données, Paris, Bordas, 1982, 159p.

[Biard, A., Bourel, D. et Brian, E., 1997], Henri Berr et la culture du 20ème siècle, n° spécial de la Revue de synthèse, dir. par A. Biard, D. Bourel et E. Brian, Paris, Albin Michel, 1997, 366p.

[Biddiss, M. D., 1977, 1980], The Ages of the Masses – Ideas and Society in Europe since 1870, London, Penguin Books, 1977 ; traduction : L’ère des masses – Histoire de la pensée européenne (Tome 6), Paris, Seuil, coll. Points, 1980, 381p.

[Bonneuil, C., 1991], Des savants pour l’empire – Structuration des recherches scientifiques coloniales au temps de la « mise en valeur des colonies françaises » 1917-1945, Mémoire de DEA sous la dir. de D. Pestre, Paris, Editions de l’ORSTOM, 125p.

[Boulaine, J., 1996], Histoire de l’agronomie en France, deuxième édition revue et augmentée, Paris, Lavoisier, coll. Tec & Doc, 1996, 437p.

[Breton, P., 1987, 1990], Une histoire de l’informatique, Paris, La Découverte, 1987 ; réédition : Seuil, 1990, 269p.

[Breton, P., 1993], « Pour une approche multidimensionnelle de l’informatique », Revue du Musée des Arts et Métiers, n°2, février 1993, pp. 4-9.

[Bud, R., 1998], Instruments of Science – An Historical Encyclopedia, ed. by R. Bud, Science Museum London, Garland Publishing, Inc., 1998.

[Burian, R. M. et Gayon, J., 1990], « La génétique après la seconde guerre mondiale. Les laboratoires de Gif », Cahiers pour l’histoire du CNRS, 1990, 7 ; disponible en anglais à l’adresse http://picardp1.ivry.cnrs.fr/~jfpicard/index.html.

[Caullery, M., 1941, 1957], Les étapes de la biologie, Paris, PUF, QSJ, 1941, réédition : 1957, 128p.

[Cavaillès, J., 1962], Philosophie mathématique, Paris, Hermann, coll. « Histoire de la pensée », 1962, 274p.

[Chaunu, P., 1975, 1984, 1994], Le temps des réformes, Paris, Fayard, 1975 ; réédition : Bruxelles, Editions Complexes ; réimpression : 1994, 2 tomes : 570p.

[Christin, O., 1991], Une révolution symbolique - l’iconoclasme huguenot et la reconstruction catholique, Paris, Editions de Minuit, 1991, 351p.

[Columbia, 2000], document du *Oral History Research Office* de Columbia University, 2000, http://www.columbia.edu/cu/librairies/indiv/oral/interviewing.html.

[Compagnon, A., 1998], Le démon de la théorie – Littérature et sens commun, Paris, Seuil, coll. La couleur des idées, 1998, 311p.

[Cooper, N. G., 1987, 1989], From Cardinals to Chaos, ed. by N. G. Cooper, Los Alamos Science, Special issue, 1987 ; Cambridge University Press, 1989, 320p.

[Cordeschi, R. et Numerico, T., 2003], “ARTORGA : The Artificial Organisms Research Group and Ashby’s legacy”, présentation faite à Pise, les 14 et 15 novembre 2003, accessible à l’adresse suivante : http://www3.humnet.unipi.it/cybernetics/docs/cordeschi_numerico.ppt.

[CTHS, 1992], L’image et la science, Actes du 115ème congrès national des sociétés savantes, Avignon, 1990, Paris, Editions du CTHS, 1992, 430p.

[Dahan-Dalmedico, A., 2003], « Modèles et modélisations : le foisonnement des pratiques contemporaines exige une réflexion théorique nouvelle », Lettre du SPM (Département des Sciences Physiques et Mathématiques du CNRS), n°42, décembre 2003, pp. 26-28.

[Dahan-Dalmedico, A. et Peiffer, J., 1986, 1996], Une histoire des mathématiques – Routes et dédales, Paris, Seuil, 1986 ; Seuil-Points, 1996, 314p.

[Davis, P., 1998], “Remembering George Forsythe”, SIAM News (Society for Industrial and Applied Mathematics), vol. 31, n°1, January-February 1998, accessible sur http://www.siam.org/siamnews/01-98/forsythe.htm, 6 pages.

[Deléage, J. P., 1991], Histoire de l’écologie, Paris, La Découverte, 1991.

[Demeure, R. J., 1999], « Physique IRM – IRM d’aujourd’hui et de demain », Louvain Médical, 1999, vol. 118, pp. 107-113.

[Denis, H., 1966, 1988], Histoire de la pensée économique, Paris, PUF, 1966 ; 8ème édition : 1988, 743p.

[Desrosières, A., 1993], La politique des grandes nombres. Histoire de la raison statistique, Paris, La Découverte & Syros, 1993 ; réédition en poche, 2000, 460p.

[Desrosières, A., 1999], article « Statistiques », in Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences, dir. D. Lecourt, Paris, PUF, 1999, pp. 874-880.

[Dietrich, M. R., 1996], "Monte-Carlo Experiments and the Defense of Diffusion Models in Molecular Population Genetics", Biology and Philosophy, vol. 11, n°3, july 1996, pp. 339-356.

[Dosse, F., 1992], Histoire du structuralisme, Tome I : 1992, 472p., Tome II : 542p., Paris, La Découverte, 1992.

[Dosse, F., 1995, 1997], L'empire du sens – L'humanisation des sciences humaines, Paris, La Découverte, 1995 ; réimpression : La Découverte/Poche, 1997, 432p.

[Duby, G., 1973], Le dimanche de Bouvines, Paris, Gallimard, 1973.

[Duby, G. et Abeles, M., 1975], « Histoire-société-imaginaire », entretien de M. Abeles avec G. Duby, Dialectiques, Automne 1975, n°10-11, pp. 111-123.

[Duchesneau, F., 1998], Les modèles du vivant de Descartes à Leibniz, Paris, Vrin, 1998, 402p.

[Dugas, R., 1959], La théorie physique au sens de Boltzmann, Neuchâtel - Suisse, éditions du Griffon, distribution : Dunod – Paris, 1959, 308p.

[Edwards, P. N., 2002], « Pourquoi fabriquer des ordinateurs ? », La Recherche, Hors-Série, n°7, avril-juin 2002, pp. 21-26.

[Fischer, J. L. et Schneider, W. H., 1990], Histoire de la génétique – Pratiques, Techniques et Théories, actes du Colloque International d'Histoire de la Génétique, Paris, 19-22 mai 1987, Paris, ARPEM et Editions Sciences en Situation, 1990, 310p.

[Frenkel, K. A., 1989], "An Interview with Ivan Sutherland", Communications of the ACM, June 1989, Vol. 32, n°6, pp. 711-718.

[Friedländer, S., 1975], Histoire et psychanalyse – Essai sur les possibilités et les limites de la psychohistoire, Paris, Seuil, 1975, 237p.

[Galison, P., 1987], How Experiments End, Chicago and London, Chicago University Press, 1987, 330p.

[Galison, P., 1996], The Disunity of Science, ed. by Peter Galison and David J. Stump, Stanford, Stanford University Press, 1996, 567p.

[Galison, P., 1997], Image and Logic, Chicago, The University of Chicago Press, 1997, 955p.

[Gardner, H., 1985, 1993], The Mind's New Science – A History of the Cognitive Revolution, New York, Basic Books Inc. Publisher ; traduction : Histoire de la révolution cognitive, Paris, Payot, 1993, 487p.

[Gaudillière, J. P., 2002], Inventer la biomédecine, Paris, La Découverte, 2002, 392p.

[Gayon, J., 1987], « Génétique des populations et évolutionnisme : esquisse d'une histoire générale (1916-1980) », Cahiers d'Histoire et de Philosophie des Sciences, nouvelle série, n°22 : nouveaux objets pour l'histoire de la biologie, pp. 86-110.

[Gayon, J., 1992], Darwin et l'après-Darwin – Une histoire de l'hypothèse de sélection naturelle, Paris, Kimé, 1992, 457p.

[Gayon, J., 2000], "History of the Concept of Allometry", American Zoologist, 2000, vol. 40, pp. 748-758.

[Gibbs, W., 2001], « La biologie virtuelle », Pour la science, octobre 2001, pp. 38-44.

[Giegerenzer, G., Swijtnik, Z., Porter, T. Daston, L., Beatty, J. and Krüger, L., 1989, 1997], The Empire of Chance – How probability changed science and everyday life, Cambridge, Cambridge University Press, Ideas in context, 1st published in 1989, reprinted in 1997, 340p.

[Gilbert, S. F., 1988], "Cellular politics : Ernest Everett Just, Richard B. Goldschmidt, and the Attempt to Reconcile Embryology and Genetics", in The American Development of Biology, ed. by R. Rainger, K. R. Benson and J. Maienschein, Philadelphia, University of Pennsylvania Press, pp. 311-346.

[Gilles, B., 1978a], « Prolégomènes à une histoire des techniques », in Histoire des techniques, Paris, Gallimard, éd. Pléiade, 1978, pp. 1-118.

[Gilles, B., 1978b], « Essai sur la connaissance technique », in Histoire des techniques, Paris, Gallimard, éd. Pléiade, 1978, pp. 1416-1477.

[Gillois, M., 1997], « Les modèles dynamiques de l'évolution », in Pour Darwin, sous la direction de P. Tort, Paris, PUF, 1997, pp. 1035-1072.

[Givernaud, N., 1999], « Georges Teissier et la génétique des populations », article en ligne tiré d'un mémoire de DEA de l'université Paris 7, 1999, accessible à l'adresse : http://picardp1.ivry.cnrs.fr/~jfpicard/Teissier.html.

[Glass, R. L., Ramesh, V. et Vessey, I., 2004], "An Analysis of Research in Computing Disciplines", Communications of the ACM, June 2004, vol. 47, n°6, pp. 89-94.

[Goujon, P., 1994a], « La biologie à l'ère de l'informatique. Connaissance et naissance de la vie artificielle », Première partie, Revue des Questions Scientifiques, 1994, 165 (1), pp. 53-84.

[Goujon, P., 1994b], « La biologie à l'ère de l'informatique. Connaissance et naissance de la vie artificielle », Seconde partie, Revue des Questions Scientifiques, 1994, 165 (2), pp. 119-153.

[Grabar, A., 1957, 1984, 1998], L'iconoclasme byzantin, Paris, collection de la Fondation Gustave Schlumberger du Collège de France, 1957 ; 2ème édition revue et corrigée : Flammarion, 1984, réimprimée en Champs-Flammarion, 1998, 477p.

[Grémy, J. P., 1989, 1995], « La simulation », article de l'Encyclopaedia Universalis, version de 1989 sur CD-ROM : 1995.

[Grimoult, C., 2001], L'évolution biologique en France – Une révolution scientifique, politique et culturelle, Genève-Paris, Droz, 2001, 298p.

[Griset, P., 1991], Les révolutions de la communication – 19ème – 20ème siècle, Paris, Hachette Supérieur, 1991, 255p.

[Guédès, M., 1969], « La théorie de la métamorphose en morphologie végétale : des origines à Goethe et Batsch », Revue d'histoire des sciences appliquées, 22, pp. 323-363.

[Guédès, M., 1972], « La théorie de la métamorphose en morphologie végétale : A. P. de Candolle et P. J. F. Turpin », Revue d'histoire des sciences appliquées, 25, pp. 253-270.

[Guédès, M., 1973], « La théorie de la métamorphose en morphologie végétale. La métamorphose et l'idée d'évolution chez Alexandre Braun », Episteme, 7, pp. 32-51.

[Hacking, I, 1990], The Taming Of Chance, Cambridge, Cambridge University Press, Ideas in Context, 1990, 266p.

[Harman, P. M., 1998], The Natural Philosophy of James Clerk Maxwell, Cambridge (UK), Cambridge University Press, 1998, 232p.

[Hicks, D., 1995-2002], "The museum of HP calculators", site Internet conçu par David Hicks et présentant des fiches techniques sur toutes les machines HP, accessible à l'adresse www.hpmuseum.org.

[Hobsbawm, E., 1994, 1999, 2003], Ages of Extremes : The Short Twentieth Century, 1914-1991, London, 1994 ; traduction : L'Age des extrêmes. Histoire du court vingtième siècle - 1914-1991, Bruxelles, 1999 et 2003, 810p.

[Hodges, A., 1983, 1988], Alan Turing : the enigma of intelligence, sans lieu, Burnett Books Limited in association with the Hutchinson Publishing Group, 1983 ; traduction abrégée : Alan Turing ou l'énigme de l'intelligence, Paris, Payot, 1988, 439p.

[Hollier, D., 1973], Panorama des sciences humaines, collectif dirigé par Denis Hollier, Paris, NRF, coll. Le point du jour, 1973, 667p.

[Horder, T. J., 2001], "The organizer concept and modern embryology : Anglo-American perspectives", Int. J. Dev. Biol., 2001, vol. 45, pp. 97-132.

[Hutchins, J., 1997a, 2003], "Looking back to 1952 : the first MT conference", article présenté au colloque Theoretical and Methodological Issues in Machine Translation, Sante Fe, New Mexico, July 1997, 13 pages ; accessible en 2003 à l'adresse : http://ourworld.compuserve.com/homepages/WJHutchins/TMI-97.htm.

[Hutchins, J., 1997b, 2003], "From first conceptions to first demonstrations : the nascent years of machine translation, 1947-1954 – A chronology", Machine Translation, vol. 12, n°3, 1997, pp. 195-252 ; accessible en 2003 à l'adresse http://ourworld.compuserve.com/homepages/WJHutchins/MTJ-1997.pdf.

[Israel, G., 2002], « John von Neumann, joueur stratégique », La Recherche, Hors-Série, n°7, avril-juin 2002, pp. 44-45.

[Jagoret, P. et Descroix, F., 2002], « Evolution de la culture de *Coffea canephora* en Afrique et problématique de développement », Plantations, recherche, développement, mai 2002, pp. 45-52.

[Jami, I., 2002], « Le parfum militaire du code génétique », La Recherche, Hors-Série, n°7, avril-juin 2002, pp. 98-100.

[Jenny, L., 2002], La fin de l'intériorité, Paris, PUF, coll. Perspectives littéraires, 2002, 164p.

[Johnson, S., 2002], "Zellig S. Harris", sité dédié à la mémoire du linguiste Zelig S. Harris, maintenu par Stephen Johnson, 2002, accessible à l'adresse http://www.dmi.columbia.edu/zellig/.

[Joutard, P., 1979], « Historiens, à vos micros ! Le document oral, une nouvelle source pour l'histoire », L'Histoire, n°12, mai 1979, pp. 106-112.

[Joutard, P., 1983], Ces voix qui nous viennent du passé, Paris, Hachette, 1983, 268p.

[Kahn, H. et Wiener, E.J., 1967, 1972], The Year 2000, Hudson Institute Inc., 1967 ; traduction : L'an 2000 – La bible des trente prochaines années, Verviers (Belgique), Gérard et Cie, Marabout Université, 1972, 519p.

[Keilling, J., 1997], « L'agriculture biologique : objectifs, techniques et résultats », Agence du Développement Durable Appliqué (ADDA), Paris, 1997, 21p., http://www.abcdpresse.fr/pdf/ADDA%20-Testament_de_Keilling.pdf.

[Keller, E. F., 1995], Refiguring life. Metaphors of Twentieth-Century Biology, Columbia Univ. Press., traduction française : Le rôle des métaphores dans les progrès de la biologie, Paris, Institut Synthélabo, 1999, 178p.

[Keller, E. F., 2000, 2003], The Century of the Gene, Harvard University Press, 2000 ; traduction : Le siècle du gène, Paris, Gallimard, 2003, 173p.

[Keller, E. F., 2002], "Models, Simulation and 'Computer Experiments' ", in The Philosophy of Scientific Experimentation, ed. by Hans Radder, University of Pittsburgh Press, 2002, 16 pages.

[Keller, E. F., 2002, 2003], Making Sense of Life. Explaining Biological Development with Models, Metaphors and Machines, Cambridge Mass., Harvard University Press, 2002, 2nde édition : 2003, 388p.

[Keller, E. F., 2004], « Génome, postgénome : quel avenir pour la biologie ? », La Recherche, n° 376, juin 2004, pp. 30-37.

[Kershaw, I., 1985, 1993, 1997], The Nazi Dictatorship. Problems and Perspectives of Interpretation, Edward Arnold, 1985, 1993 (dernière édition anglaise) ; traduction : Qu'est-ce que le nazisme ? Problèmes et perspectives d'interprétation, Paris, Gallimard, 1992, coll. Folio-histoire, 1997 (pour l'édition en français augmentée de deux chapitres), 538p.

[Kingsland, S. E., 1985, 1995], Modeling Nature – Episodes in the History of Population Ecology, Chicago and London, The University of Chicago Press, 1985 ; seconde édition avec une nouvelle postface : même éditeur, 1995, 306p.

[Klein, E., 2000], L'unité de la physique, Paris, PUF, Science histoire et société, 2000, 336p.

[Landais, E. et Bonnemaire, J., 1996], « La zootechnie, art ou science ? Entre nature et société, l'histoire exemplaire d'une discipline finalisée », Courrier de l'environnement, n°27, août 1996 ; accessible à l'adresse http://www.inra.fr/dpenv/landc27.htm, 21p.

[L'Héritier, P., 1984], La grande aventure de la génétique, Paris, Flammarion, 1984, 385p.

[Le Goff, J., 1977, 1984], La civilisation de l'occident médiéval, Paris, Arthaud, 1977 ; réédition : Paris, 1984, Arthaud, 510p.

[Le Lionnais, F., 1962], Les grands courants de la pensée mathématique, Paris, Blanchard, 1962, 560p.

[Lebreton, P., 2001], « L'écologie est-elle une science, une philosophie ou une politique ? », Mémoires de l'Académie des Sciences, Belles-Lettres et Arts de Lyon, troisième série, T. 55, année 2000, 2001, p. 83-94.

[Lecourt, D., 1976, 1995], Lyssenko : Histoire réelle d'une « science prolétarienne », Paris, Maspero, 1976 ; réimpression augmentée : Paris, PUF-Quadrige, 1995, 288p.

[Legay, J. M. et Schmid, A. F., 2002], « Du ver à soie à la modélisation. Comment devient-on indiscipliné ? », entretien d'Anne-Françoise Schmid avec Jean-Marie Legay, Natures Sciences Sociétés, vol. 10, n°1, pp. 59-63.

[Lehmer, D. H., 2001], "The Lehmers at Berkeley", textes et images à vocation historique présentés par l'administration centrale de l'Université Berkeley de Californie, révisés en 2001, sur le site : www.lib.berkeley.edu/BANC/Exhibits/Math/lehmer.html.

[Lemaître, J., 1990, 1995], « Résistance des matériaux », article de la version de l'Encyclopédia Universalis sur CD-ROM, 1995, correspondant à l'article de la version papier situé vol. 19, pp. 903-910, 1990.

[Lévènez, E., 1999], "Computer Languages History", tableau récapitulant les dates de naissances et les rapports mutuels de 50 langages informatiques, disponible sur http://www.levenez.com/lang/.

[Lévy-Leblond, J. M., 1982], « Physique et mathématiques », in Penser les mathématiques, Paris, Seuil, 1982, pp. 194-210.

[Libera (de), A., 1996], La querelle des universaux – De Platon à la fin du Moyen-Âge, Paris, Seuil, coll. Des Travaux, 1996, 511p.

[Lochak, G., 1994], La géométrisation de la physique, Paris, Flammarion, Champs, 1994, 272p.

[Louis, P. et Roger, J., 1988], Transfert de vocabulaire dans les sciences, Actes de la Table ronde du CNRS, sous la direction de Pierre Louis et Jacques Roger, Paris, Editions du CNRS, 1988, 338p.

[Machover, C., 1997], "Computer Graphics Pioneers", Computer Graphics, February 1997, pp. 7-8.

[Mackenzie, D. A., 1981], Statistics in Britain, 1865-1960, Edinburgh University Press, 1981, 306p.

[Maini, P. K., Schnell, S. et Jollife, S., 2004], "Bulletin of Mathematical Biology – Facts, Figures and Comparisons", Bulletin of Mathematical Biology, 2004, vol. 66, pp. 595-603.

[Malamoud, C. et Vernant, J. P., 1986], Corps des dieux, collectif sous la direction de Charles Malamoud et Jean-Pierre Vernant, Paris, Gallimard, 1986, réédition : Folio-histoire, 2003, 701p.

[Malécot, G. et Bocquet-Appel, J. P., 1996], « Interview de Gustave Malécot – mai 1993 – avril 1994 », Bull. et Mém. de la Société d'Anthropologie de Paris, n. s. t. 8, 1996, pp. 105-114 ; disponible à l'adresse Internet suivante http://www.ivry.cnrs.fr/deh/bocquet.

[Mandelbrot, B., 1986], « Comment j'ai découvert les fractales », La Recherche, mars 1986, réédité dans La Recherche, mai 2000, pp. 84-86.

[Mattelart, A., 1994], L'invention de la communication, Paris, La Découverte, 1994, 380p.

[Mayet, L., 2001], Dieu joue-t-il aux dés ? L'empire des probabilités, numéro hors-série de Sciences et Avenir, dir. par L. Mayet, n°128, octobre-novembre 2001, 98p.

[Mayr, E., 1982, 1989, 1995], The Growth of Biological Thought. Diversity, Evolution and Inheritance, The Belknap Press of Harvard University Press, 1982 ; traduction : Histoire de la biologie. Diversité, évolution et hérédité, Paris, Fayard, 1989 ; réédition : Paris, Livre de Poche, 199,5, 1205p.

[Meier, D., 2003], "HP 9825 A/S Desktop Computer Specifications", manuel de spécifications du calculateur HP 9825, http://www.n4mw.com/hp9825/spec/spec01.jpg.

[Mickulecky, D. C., 1996], "Robert Rosen : the well posed question and its answer – Why are organisms different form machines ?", article de 1996, sans lieu, 12 pages, accessible sur le site http://view.vcu.edu/~mikuleck/.

[Monroe Computer Museum of America, 2002], "Monroe Mechanical Adding-Calculator", 1 page de document sur http://www.computer-museum.org/collections/monroe_addc.html.

[Monferran, J. P., 1998], « L'affaire Lyssenko », L'Humanité, 14 avril 1998 ; accessible sur les archives internet du journal à l'adresse http://www.humanite.fr/journal/1998-04-14.

[Modeling & Simulation, 2002], "50th Anniversary Issue", Modeling & Simulation, vol. 1, n°3, july-september 2002, 44p.

[Morange, M., 1994], Histoire de la biologie moléculaire, Paris, La Découverte, 1994, 357p.

[Mounin, G., 1968, 2000], Clefs pour la linguistique, Paris, Seghers, 1968 ; réimpression : Paris, Bibliothèques 10/18, 173p.

[Mounin, G., 1972], La linguistique au XXème siècle, Paris, PUF, coll. Sup., 1972, 253p.

[Müller, A., 2000], « Eine kurze Geschichte des BCL – Heinz von Foerster und das Biological Computer Laboratory », 17 pages d'Albert Müller, 2000, accessibles sur le site http://www.univie.ac.at/constructivism/papers/mueller/mueller00-bcl.html.

[Nagylaki, T., 1989], "Gustave Malécot and the Transition from Classical to Modern Population Genetics", Genetics, June 1989, 122, pp. 253-268.

[NIH, 2000], "Laboratory Instrument Computer (LINC) – The Genesis of a Technological Revolution", par Samuel Rosenfeld, disponible le 22/06/2000 sur le site des National Institutes of Health, adresse : http://www.nih.gov/od/museum/exhibits/linc/2.html

[Ory, P., 1987], Nouvelle histoire des idées politiques, Paris, Hachette-Pluriel, 1987, 832p.

[Pauly, P. J., 1987], Controlling Life – Jacques Loeb & the Engineering Ideal in Biology, Berkeley, University of California Press, 1987, 256p.

[Pavé, F., 2002], « Du concept pur aux applications pratiques et retour – Les tribulations de l'Institut Henri Poincaré et de l'Institut de la Statistique de l'Université de Paris », Gérer et Comprendre, mars 2002, n°67, pp. 63-66.

[Penfield, P., 2000], "Samul Jefferson Mason", biographie de S. J. Mason écrite par P. Penfield, disponible sur http://www-eecs.mit.edu/gret-educators/mason.html.

[Perrin, J., 1913, 1991], Les atomes, Paris, Flammarion, collection « Champs », réédition du texte de 1913, 1991, 292p.

[Pestre, D., 2002], « La pensée mathématique des systèmes », La Recherche, Hors-Série, n°7, avril-juin 2002, pp. 10-15.

[Picard, J. F., 1990], La république des savants - La recherche française et le CNRS, Paris, Flammarion, 1990, 339p.

[Pichot, A., 1993], Histoire de la notion de vie, Paris, Gallimard-TEL, 1993, 973p.

[Pichot, A., 1999], Histoire de la notion de gène, Paris, Champs-Flammarion, 1999, 347p.

[Picon, G., 1957], Panorama des idées contemporaines, collectif sous la direction de Gaëtan Picon, Paris, NRF, coll. Le point du jour, 1957, 793p.

[Poirier, H., 2003], « La théorie constructale, clé des formes parfaites », Science et Vie, novembre 2003, n°1034, pp. 45-63.

[Pouget, J. M., 2001], La science goethéenne des vivants – De l'histoire naturelle à la biologie évolutionniste, Bern, Peter Lang, coll. contacts, 2001, 433p.

[Ramunni, G., 1989a], La physique du calcul – Histoire de l'ordinateur, Paris, Hachette, 1989, 287 p.

[Ramunni, G., 1989b], « L'industrie française du logiciel », Science & Vie, n° Hors-Série : 200 ans de science 1789-1989, mars 1989, pp. 305-307.

[Ramunni, G., 1989c], « La non-construction du premier calculateur électronique au CNRS », Cahiers pour l'Histoire du CNRS, vol. 4, 1989, éditions du CNRS, pp. 113-142.

[Ramunni, G., 1995], Les sciences pour l'ingénieur – Histoire du rendez-vous des sciences et de la société, Paris, CNRS éditions, 1995, 148p.

[Raymond, P., 1975a], L'histoire et les sciences, Paris, François Maspero, collection « Algorithme », 1975, 93p.

[Raymond, P., 1975b], « Cinq questions sur l'histoire des mathématiques », Dialectiques, Automne 1975, n°10-11, pp. 93-107.

[Rissik, A., 2000], "Men in the psychiatrist's chair", recension par Andrew Rissik de l'ouvrage d'Anthony Clare : *On Men : Masculinity in crisis*, Chattoo & Windus, London, 2000 ; parue dans The Guardian, Saturday August 12, 2000 ; accessible sur http://www.guardian.co.uk/Archive/Article/0,4273,4050515,00.html.

[Robins, R. H., 1967, 1976], A Short History of Linguistics, London, Longmans, 1967 ; traduction : Brève histoire de la linguistique, Paris, Seuil, 1976, 253p.

[Roger, J., 1995], Pour une histoire des sciences à part entière (recueil posthume d'articles divers), Paris, Albin Michel, 1995, 476p.

[Roger, J. *et al.*, 1981], Actes du colloque R. A. Fisher et l'histoire de la génétique des populations (Paris 5-6 décembre 1980), J. Roger dir., Revue de Synthèse, Série générale, juillet-décembre 1981, 103-104, 470p.

[Roll-Hansen, N., 1984], "E. S. Russel and J. H. Woodger : The Failure of Two Twentieth-Century Opponents of Mechanistic Biology", Journal of the History of Biology, 1984, vol. 17, n°3, pp. 399-428.

[Rougerie, G., 1967], La Côte-d'Ivoire, Paris, QSJ, 1967, 128p.

[Ruse, M., 1975], "Woodger on Genetics – A Critical Evaluation", Acta Biotheoretica, 1975, vol. 24, n°1-2, pp. 1-13.

[Russo, F., 1972], Pour une bibliothèque scientifique, Paris, Seuil, 1972, 224p.

[Russo, F., 1983], Nature et méthode de l'histoire des sciences, Paris, Albert Blanchard, 1983, 503p.

[Sadoul, G., 1961], « La destruction massive des témoignages filmés », in L'histoire et ses méthodes, Paris, Gallimard, Pléiade, 1961, pp. 1167-1178.

[Salisbury, D., 1997], "Georges Forsythe, His Vision and Its Effects – Note in response to a query", Stanford News Service, 2 pages, November 26, 1997, http://www-db.stanford.edu/pub/voy/museum/ForsytheNews.html.

[Schmitt, S., 2000], Histoire du problème des parties répétées. De la morphologie idéaliste à la génétique du développement, Thèse de philosophie, Paris 7, préparée sous la direction de M. Morange, 2000, 708p.

[Segal, J., 1998], Théorie de l'information : sciences, techniques et sociétés de la seconde guerre mondiale à l'aube du XXIème siècle, Thèse de doctorat, sous la direction de G. Ramunni, Université Lyon 2, 1998, disponible sur le site http://www.mpiwg-berlin.mpg.de/staff/segal/thesis/.

[Segal, J., 2003], Le zéro et le un – Histoire de la notion scientifique d'information au 20ème siècle, Paris, Syllepse, 2003, 890p.

[Selme, P., 1963], Le microscope électronique, Paris, PUF, QSJ, 1963, 128p.

[Shapin, S. et Schaffer, S., 1985, 1989], Leviathan and the Air-Pump, Princeton University Press, 1985 ; réimpression avec corrections : 1989, 440p.

[Smith, A. R. et Heckbert, P., 2003], "A Brief History of the New York Institute of Technology Computer Graphics Lab", 4 pages, accessibles sur http://www-2.cs.cmu.edu~ph/nyit/masson/nyit.html.

[Stengers, I., 1987], D'une science à l'autre – des concepts nomades, collectif sous la direction d'Isabelle Stengers, Paris, Seuil, 1987, 392p.

[Sun, 1999], "Profile : Ivan Sutherland, Sun Fellow and VP of Sun Microsystems", dossier d'une vingtaine de pages sur Ivan Sutherland, accessible sur le site de la société *Sun* à l'adresse http://www.sun.com/960710/feature3/ivan-profile.html.

[Swinton, J., 2003],"Alan Turing and Morphogenesis", mars 2003, http://www.swintons.net/jonathan/turing.htm.

[Taton, R., 1961, 1995], La science contemporaine, vol. 1 : le XIXème siècle, Paris, PUF, 1ère édition : 1961, édition Quadrige : 1995, 757p.

[Taton, R., 1964, 1995], La science contemporaine, vol. 2 : le XXème siècle – années 1900-1960, Paris, PUF, 1ère édition : 1964, édition Quadrige : 1995, 1072p.

[Ten Dyke, R. P. et Kunz, J. C., 1989], "Object-Oriented Programming", IBM Systems Journal, 1989, vol. 28, n°3, pp. 465-478.

[Tomassone, R. et Legay, J. M., 1999], « La biométrie, une discipline ouverte sur toutes les autres », Natures Sciences Sociétés, 1999, vol. 7, n°4, pp. 36-45.

[Thévenot, J., 1961], « Les machines parlantes », in L'histoire et ses méthodes, Paris, Gallimard, Pléiade, 1961.

[Varenne, F., 2003b], « La simulation informatique face à la méthode des modèles », Natures Sciences Sociétés, vol. 11, 2003, n°1, pp. 16-28.

[Varenne, F., 2004b], « Nicholas Rashevsky (1899-1972) : de la biophysique à la biotopologie », Actes du Congrès National d'Histoire des Sciences et des Techniques (organisé par la Société Française d'Histoire des Sciences et des Techniques), Poitiers, 20-22 mai 2004, à paraître, 2p.

[Varenne, F., 2005b], « Un aperçu sur la biologie théorique au 20ème siècle : le cas de la forme des plantes », Actes du 16ème Colloque Interdisciplinaire de Carcassonne, dont le thème était « Pour une éthique de la compréhension », organisé conjointement par l'Université Paul Sabatier et par l'ADREUC (Association pour le Développement des Rencontres et des Echanges Universitaires et Culturels), 2-4 juillet 2004, à paraître en 2005.

[Vérin, H., 1993], La gloire des ingénieurs – L'intelligence technique du XVIème au XVIIIème siècle, Paris, Albin Michel, 1993, 455p.

[Veyne, P., 1971], Comment on écrit l'histoire, Paris, Seuil, 1971 ; réédition du texte intégral, 1978, 438p.

[Vissac, B. et Deffontaines, J. P., 1999], « L'histoire du SAD – Pour une grille de lecture », Le Sadoscope, supplément au n°100, octobre-novembre 1999, pp. 1-4.

[Vogel, G. et Angermann, H., 1984, 1994], Atlas zur Biologie, DTV, Münich, 1984 ; traduction : Atlas de la biologie, Livre de Poche / La Pochotèque, 1994, 638p.

[Waldrop, M., 2002], « Les origines de l'ordinateur personnel », Pour la science, mars 2002, n°293, pp. 10-15.

[Witkowski, N., 1998], « D'Arcy Thompson fantôme de la biologie – Des outils mathématiques et physiques pour expliquer les formes du vivant », La Recherche, n°305, janvier 1998, pp. 27-30.

[Zinc, G., 2000], L'ancien français, Paris, PUF, QSJ, 2000, 128p.

[Zobel, R. N., 2000], "A Personal History of Simulation in the UK and Europe, 1964-2001", International Journal of Simulation, Systems, Sciences and Technology, vol. 1, n°1-2, December 2000, pp. 69-79, accessible sur http://ducati.doc.ntu.ac.uk/uksim/journal/issue-1/RichardZobel/RichardZobel.pdf.

II- Philosophie et sociologie des sciences contemporaines

Avertissement : Comme nous l'avons expliqué dans notre introduction et dans nos annexes A et B, un certain nombre d'ouvrages figurant ici au titre de sources secondaires ont en fait été utilisés comme sources primaires.

[Achinstein, P., 1968, 1971], Concepts of Science – A philosophical analysis, Baltimore and London, The Johns Hopkins Press, 1968 ; Johns Hopkins Paperbacks edition, 1971, 266p.

[Althusser, L., 1968a], « Lénine et la philosophie », Bulletin de la Société Française de Philosophie, séance du samedi 24 février 1968, t. LXIII, 1968.

[Althusser, L., 1968b], Lire le Capital, Paris, Petite collection Maspero, vol. 2, 228p.

[Althusser, L., 1974], Philosophie et philosophie spontanée des savants (1967), Paris, Maspero, 1974, série de cours donnés à l'ENS en 1967, 157p.

[Althusser, L., 1994, 1999], Ecrits philosophiques et politiques, Tome I, Paris, Stock IMEC, 1994 ; réédition : Livre de Poche, Biblio-essais, 1999, 605p.

[Althusser, L., 1995, 2001], Ecrits philosophiques et politiques, Tome II, Paris, Stock IMEC, 1995 ; réédition : Livre de Poche, Biblio-essais, 2001, 632p.

[Andler, D., Fagot-Largeault, A. et Saint-Sernin, B., 2002], Philosophie des sciences, Tome I et II, Paris, Folio, coll. Essais, 2002, 1334p.

[Arendt, H., 1958, 1961, 1994], The Human Condition, 1958 ; traduction chez Calmann-Lévy : Condition de l'homme moderne, 1961, version rééditée en coll. Agora-Pockett, 1994, 406p.

[Arnheim, R., 1969, 1976, 1997], Visual Thought, University of California Press, 1969 ; traduction : La pensée visuelle, Paris, Flammarion, 1976 ; réimpression : Champs-Flammarion, 1997, 350p.

[Aron, R., 1938, 1970], La philosophie critique de l'histoire, Paris, Vrin, 1938 ; réédition : Paris, Seuil, coll. Points, 1970, 318p.

[Aron, R., 1948], Introduction à la philosophie de l'histoire, Paris, NRF-Gallimard, 1948, 353p.

[Aron, R., 1970, 1998], Marxismes imaginaires – D'une sainte famille à l'autre, Paris, Gallimard, 1970 ; réimpression : Folio-essais, 1998, 347p.

[Arsac, J., 1987], Les machines à penser, Paris, Seuil, 1987, 256p.

[Attali, J., 1975], La parole et l'outil, Paris, PUF, 1975, 243p.

[Austin, J. L., 1962, 1970], How to do Things with Words, Oxford University Press, 1962 ; traduction : Quand dire, c'est faire, Paris, Seuil, 1970, 187p.

[Bachelard, G., 1928, 1973], Essai sur la connaissance approchée, Paris, Vrin, 1928 ; réédition : 1973, 310p.

[Bachelard, G., 1938, 1980], La formation de l'esprit scientifique, Paris, Vrin, 1938 ; 11ème édition : 1980, 257p.

[Bachelard, G., 1940, 1983], La philosophie du non, Paris, PUF, 1940 ; 9ème édition : 1983, 147p.

[Bachelard, G., 1949, 1962], Le rationalisme appliqué, Paris, PUF, 1949 ; 2ème édition : 1962, 216p.

[Bachelard, G., 1951, 1965], L'activité rationaliste de la physique contemporaine, Paris, PUF, 1951 ; 1965 : 4ème édition, 225p.

[Bachelard, G., 1953, 1990], Le matérialisme rationnel, Paris, PUF, 1953 ; édition Puf-Quadrige : 1990, 225p.

[Bachelard, S., 1958], La conscience de rationalité, Paris, PUF, 1958, 217p.

[Bachelard, S., 1979], « Quelques aspects historiques des notions de modèle et de justification des modèles, in [Delattre, P. et Thellier, M., 1979], Tome I, pp. 3-19.

[Badiou, A., 1969], Le concept de modèle, Paris, Maspero, collection « Théorie » dirigée par L. Althusser, 1969, 94p.

[Badiou, A., 1976], Théorie de la contradiction, Paris, François Maspero, série « Yenan Synthèses », 1976, 116p.

[Barberousse, A., 1999], L'expérience, Paris, Garnier-Flammarion, 1999, 255p.

[Barberousse, A., 2000], La physique face à la probabilité, Paris, Vrin, 2000, 210p.

[Barberousse, A. *et al*., 2000], La philosophie des sciences au XXème siècle, coll., auteurs : A. Barberousse, M. Kistler, P. Ludwig, Paris, Champs Université, Flammarion, 2000, 353p.

[Barberousse, A., Ludwig, P., 2000], « Les modèles comme fictions », Philosophie, n°68, décembre 2000, pp. 16-43.

[Barrow, J. D., 1992, 1996, 2003], Perché il mondo è matematico ?, Rome, éditions Laterza, 1992 ; traduction : Paris, Odile Jacob : Pourquoi le monde est-il mathématique ?, 1996, réimpression en coll. « poches » : 2003, 117p.

[Baudrillard, J., 1981, 2002], Simulacres et simulation, Paris, Galilée, 1981 ; réimpression : 2002, 235p.

[Beaune, J. C., 1998], Philosophie des milieux techniques, Paris, Champ-Vallon, 1998, 618p.

[Bedau, M. A. 1998], "Philosophical content and method of Artificial Life", in The Digital Phoenix: How computers are changing philosophy, ed. by T. W. Binum and J.H Moor, Basil Blackwell, Oxford, pp. 135-152.

[Benacerraf, P., Putnam, H., 1964, 1983], Philosophy of Mathematics, Prentice Hall, 1964; Cambridge University Press (2nd edition), 1983, 600p.

[Benoist, J. et Merlini, F., 2001], Historicité et spatialité, Paris, Vrin, 2001, 255p.

[Berger, P, 1999], L'informatique libère l'humain, Paris, L'Harmattan, 1999, 216p.

[Bergson, H., 1896, 1939, 1993], Matière et mémoire, Paris, 1896 ; PUF, 1939 ; 4ème édition : PUF-Quadrige, 1993, 281p.

[Bergson, H., 1941], L'évolution créatrice, Paris, PUF, 1941, 372p.

[Berthelot, J. M., 2001], Epistémologie des sciences sociales, Paris, PUF, Coll. Premier Cycle, 2001, 593p.

[Besançon, A., 1970], Histoire et expérience du moi, Paris, Flammarion, 245p.

[Besançon, A., 1994], L'image interdite – Une histoire intellectuelle de l'iconoclasme, Paris, Fayard, 1994, 526p.

[Bishop, M. A. and Trout, J. D., 2002], "50 Years of Successful Predictive Modeling Should Be Enough : Lessons for Philosophy of Science", Philosophy of Science, 69 (September 2002), pp. S197-S208.

[Bitsakis, E., 1973, 1983], Physique et matérialisme, 1ère édition en 1973 sous le titre Physique contemporaine et matérialisme dialectique, 2ème édition : Paris, Editions sociales, 1983.

[Black, M., 1962, 1976], Models and Metaphors – Studies in Language and Philosophy, Ithaca and London, Cornell University Press, 1962, sixth printing : 1976, 267p.

[Blanché, R., 1972], L'épistémologie, Paris, PUF, QSJ, 1972, 127p.

[Blumenberg, H., 1966, 1988, 1999], Die Legitimität der Neuzeit, Frankfurt am Main, Suhrkamp Verlag, 1966 ; 2ème édition : 1988 ; traduction à partir de la 2ème édition : La légitimité des temps modernes, Paris, Gallimard, 1999, 688p.

[Boorstin, D. J., 1971], L'image, traduction de l'anglais - version originale américaine non citée ni datée -, Paris, UGE 10/18, 1971, 436p.

[Boudon, R. et Clavelin, M., 1994], Le relativisme est-il résistible ?, Paris, PUF, coll. Sociologies, 1994, 324p.

[Bougnoux, D., 1993], Sciences de l'information et de la communication, Paris, Larousse, coll. Textes essentiels, 1993, 809p.

[Bouleau, N., 1999], Philosophies des mathématiques et de la modélisation, Paris, l'Harmattan, 1999, 363p.

[Bourg, D., 1996], L'homme artifice, Paris, Gallimard, 1996.

[Boutot, A., 1991], « La philosophie du chaos », Revue Philosophique, Paris, PUF, n°2, 1991, pp. 145-178.

[Boutot, A., 1993], L'invention des formes, Paris, Odile Jacob, 1993, 377p.

[Bouveresse, J., 1974, 1987], Le mythe de l'intériorité – Expérience, signification et langage privé chez Wittgenstein, Paris, Editions de minuit, 1987, 734p.

[Bouveresse, J., 1991], « Hertz, Boltzmann et le problème de la vérité des théories », in La vérité est-elle scientifique ?, Séminaire Interdisciplinaire du Collège de France, Paris, Editions Universitaires, 1991, p. 117-141.

[Bouveresse, J., 1993, 2004], Robert Musil – L'homme probable, le hasard, la moyenne et l'escargot de l'histoire, Paris, Editions de l'Eclat, 1993 ; réédition : 2004, 317p.

[Bouveresse, J., 1995], Langage, perception et réalité – Tome 1 : la perception et le jugement, Nîmes, Editions Jacqueline Chambon, 1995, 487p.

[Bouveresse, J., 1998], Le philosophe et le réel, entretiens avec Jean-Jacques Rosat, Paris, Hachette-Littératures, 1998, 263p.

[Bouveresse, J., 2001], « Ludwig Boltzmann et la philosophie », in La philosophie autrichienne de Bolzano à Musil, Paris, Vrin, 2001, pp. 139-169.

[Brenner, A., 2003], Les origines françaises de la philosophie des sciences, Paris, PUF, 2003, 224p.

[Brès, Y., 2002], L'avenir du judéo-christianisme, Paris, PUF, 2002, 127p.

[Breton, P. et Proulx, S., 1989], L'explosion de la communication – La naissance d'une nouvelle idéologie, Paris, La Découverte, 1989, 286p.

[Breton, P. *et al.*, 1990], La techno-science en question – Eléments pour une archéologie du XXe siècle, collectif de Philippe Breton, Alain-Marc Rieu et Franck Tinland, Paris, Champ-Vallon, coll. Milieux, 1990, 252p.

[Bruaire, C., 1980, 1995], « Hegel », article de l'édition de 1980 de l'Encyclopedia Universalis, réédité sous CD-ROM, 1995.

[Bruaire, C., 1985, 1993], La dialectique, Paris, PUF, QSJ, 1985 ; 2ème édition : 1993, 127p.

[Bruckner, P., 1983, 1986], Le sanglot de l'homme blanc, Paris, Seuil, 1983 ; réimpression : Seuil, coll. Points Actuels, 1986, 316p.

[Brügger, N., Frandsenn, F. et Pirotte, D., 1993], Lyotard, les déplacements philosophiques, collectif dir. par Niels Brügger *et al.*, Bruxelles, De Boeck Université, 1993, 159p.

[Bueno, O., French, S. and Ladyman, J., 2002], "On representing the Relationship between the Mathematical and the Empiricial", Philosophy of Science, 69 (September 2002), pp. 497-518.

[Bunge, M., 1968], « Les concepts de modèle », L'âge de la science, n°3, juillet-septembre 1968, p. 165-180.

[Caillé, A., 1989, 2003], Critique de la raison utilitaire – Manifeste du M.A.U.S.S., Paris, La Découverte, 1989 ; réimpression : 2003, 168p.

[Canguilhem, G., 1955], La formation du concept de réflexe aux XVIIème et XVIIIème siècles, Paris, PUF, 1955, 208p.

[Canguilhem, G., 1963, 1968, 1994], « Modèles et analogies dans la découverte en biologie », conférence prononcée au *Symposium on the History of Science*, University of Oxford, 9-15 july 1961, publiée en anglais en 1963, traduite et publiée dans les Etudes d'histoire et de philosophie des sciences concernant les vivants et la vie, Paris, Vrin, 1968, réimpression : 1994.

[Canguilhem, G., 1972], La mathématisation des doctrines informes, actes du colloque tenu à l'Institut d'Histoire des Sciences de l'Université de Paris, sous la dir. de G. Canguilhem, Paris, Hermann, 1972, 237p.

[Canguilhem, G., 1977, 2000], Idéologie et rationalité, Paris, Vrin, 1977 ; réédition : Paris, Vrin, 2000, 145p.

[Carnap, R., 1928, 2002], Der logische Aufbau der Welt, Berlin, Weltkreis-Verlag, 1928 ; traduction : La construction logique du monde, Paris, Vrin, 2002, 370p.

[Carnap, R., 1932, 1934, 1995], « Die physikalische Sprache als Universalsprache der Wissenschaft », Erkenntnis, Bd. 2, H 5/6, pp. 432-465 ; traduction : The unity of science, Chippenham, Wiltshire, Antony Roewe, 1934 ; réimpression : Thoemmes Press, Bristol, 1995, 101p.

[Carnap, R., 1934], "On the Character of Philosophical Problems", Philosophy of Science, 1934, vol. 1, n°1, pp. 5-19.

[Carnap, R., 1934, 1937, 2002], Logische Syntax des Sprache, Julius Springer, Wien, 1934 ; The logical syntax of language, traduit de l'allemand par A. S. von Zeppelin, London, Paul Kegan, 1937 ; réimpression : London, Open Court, 2002, 352p.

[Carrier, M. *et al.*, 2000], actes du colloque commun aux Universités de Konstanz (Allemagne) et de Pittsburgh (Etats-Unis), 3-7 octobre 1997 ; titre de l'ouvrage résultant : Science at Century's End – Philosophical questions on the Progress and Limits of Science, ed. by Carrier, M., Massey, G. J. et Ruetsche, L., University of Pittsburgh Press / Universitätsverlag Konstanz, 2000, 385p.

[Carrilho, M. M., 1997], Rationalités – Les avatars de la raison dans la philosophie contemporaine, Paris, Hatier, 1997, 80p.

[Cartwright, N., 1983], How the Laws of Physics lie, Oxford, Oxford University Press, 1983, 221p.

[Cassirer, E., 1910, 1977], Substanzbegriff und Funktionsbegriff – Untersuchungen über die Grundfragen der Erkenntniskritik, Berlin, 1910 ; traduction : Substance et Fonction – éléments pour une théorie du concept, Paris, Editions de Minuit, 1977, 429p.

[Cassirer, E., 1924, 1973], Sprache und Mythos, sans lieu, 1924 ; traduction : Langage et mythe, Paris, Editions de Minuit, 1973, 125p.

[Cassirer, E., 1929, 1972, 1999], Philosophie der symbolischen Formen III, sans lieu, 1929 ; traduction : Philosophie des formes symboliques – III. La phénoménologie de la connaissance, Paris, Editions de Minuit, 1972 ; réimpression : 1999, 610p. ; plus particulièrement : « 'Symbole' et 'schéma' dans le système de la physique moderne », pp. 494-527.

[Cassirer, E., 1945, 1970, 1991], "Rousseau-Kant-Goethe. Two Essays", Journal of the History of Ideas, 1945, sans date précise ni numéros de page ; réimpression : Princeton, Princeton University Press, 1970 ; traduction : Rousseau, Kant, Goethe. Deux essais, Paris, Belin, 1991, 143p.

[Cavaillès, J., 1935], « L'école de Vienne au Congrès de Prague », Revue de métaphysique et de morale, vol. 42, n°1, 1935, pp. 137-149.

[Cavaillès, J., 1947, 1960], Sur la logique et la théorie de la science, Paris, PUF, 1ère édition : 1947, 2ème édition : 1960, 79p.

[CCI, 1989], Les chemins du virtuel – Simulation informatique et création industrielle, Paris, collection « les cahiers du Centre de Création Industrielle » du Centre Georges Pompidou, 1989, 191p.

[Chalmers, A. F., 1976, 1987, 1990], What is this Thing Called Science ? An Assessment of the Nature and Status of Science and its Methods, University of Queensland Press, St Lucia, 1976 : traduction : Qu'est-ce que la science ?, Paris, La Découverte, 1987 ; réedition : LdP, biblio-essais, 1990, 287p.

[Charon, J. E., 1965], De la physique à l'homme, Paris, Gonthier, coll. Médiations, 1965, 189p.

[Châtelet, G., 1993], Les enjeux du mobile, Paris, Seuil, 1993, 282p.

[Chazal, G., 1994], « La simulation informatique comme mesure du possible », in La mesure : instruments et philosophes, Actes du Colloque des 28-29 octobre 1993, au Centre d'Analyse des Formes et des Systèmes de la Faculté de Philosophie de Lyon III, Paris, Champ-Vallon, 1994, pp. 147-155.

[Chazal, G., 1995], Le miroir automate – introduction à une philosophie de l'informatique, Paris, Champ-Vallon, 1995, 254p.

[Chazal, G., 1996], « La pensée et les machines – Le mécanisme algorithmique de John von Neumann », in [Neumann (von), J., 1948, 1951, 1996], pp. 7-58.

[Chazal, G., 1997], Formes, Figures, Réalité, Paris, Champ-Vallon, 1997, 251p.

[Chazal, G., 2000], Les réseaux du sens, Paris, Champ Vallon, 2000, 281p.

[Chenet, F. X., 1994], L'assise de l'ontologie critique – L'esthétique transcendantale, Presses Universitaires de Lille, 1994, 440p.

[Cohen-Tannoudji, G., 1996, 1997], Virtualité et réalité dans les sciences, collectif sous la dir. de Gilles Cohen-Tannoudji, Paris, Editions Frontières, 1996 ; réédition : Diderot multimédia, 1997, 219p.

[Comte, A., 1844, 1963], Discours sur l'esprit positif, 1ère édition : Paris, 1844 ; réédition : Paris, 10/18, 1963, 185p.

[Cournot, A. A., 1838-1877, 1958], Critique philosophique – Textes choisis, sélection d'extraits par Claude Khodoss, Paris, PUF, 1958, 237p.

[Dagognet, F., 1955], Philosophie biologique, Paris, PUF, coll. Initiation philosophique, 1955, 107p.

[Dagognet, F., 1969, 2002], Tableaux et langages de la chimie – Essai sur la représentation, Paris, Seuil, 1969 ; réédition : Champ-Vallon, coll. Milieux, 2002, 211p.

[Dagognet, F., 1970], Le catalogue de la vie – Etude méthodologique sur la taxinomie, Paris, PUF, 1970, 189p.

[Dagognet, F., 1973a], Des révolutions vertes – Histoire et principes de l'agronomie, Paris, Hermann, 1973, 182p.

[Dagognet, F., 1973b], Ecriture et iconographie, Paris, Vrin, 1973, 171p.

[Dagognet, F., 1975, 2000], Pour une théorie générale des formes, Paris, Vrin, 1975 ; réimpression : Vrin, 2000, 195p.

[Dagognet, F., 1977], Une épistémologie de l'espace concret, Paris, Vrin, 1977, 223p.

[Dagognet, F., 1979], Mémoire pour l'avenir – Vers une méthodologie de l'informatique, Paris, Vrin, 1979, 201p.
[Dagognet, F., 1984a], Philosophie de l'image, Paris, Vrin, 1984, 255p.
[Dagognet, F., 1984b], Le nombre et le lieu, Paris, Vrin, 1984, 212p.
[Dagognet, F., 1985], Rematérialiser, Paris, Vrin, 1985, 268p.
[Dagognet, F., 1988], La maîtrise du vivant, Paris, Hachette, 1988, 202p.
[Dagognet, F., 1990], Corps réfléchis, Paris, Editions Odile Jacob, 1990, 272p.
[Dagognet, F., 1993], Réflexions sur la mesure, Paris, Encre marine, 1993, 189p.
[Dagognet, F., 1994], Le trouble, Paris, Les empêcheurs de penser en rond, Synthélabo, 1994, 194p.
[Dagognet, F., 1997], Georges Canguilhem – Philosophe de la vie, Paris, Les empêcheurs de penser en rond, Synthélabo, 1997, 201p
[Dagognet, F., 1998], Savoir et pouvoir en médecine, Paris, Les empêcheurs de penser en rond, Synthélabo, 1998, 288p
[Dagognet, F., 1999], Les outils de la réflexion – Epistémologie, Paris, Les empêcheurs de penser en rond, 1999, 430p.
[Dagognet, F., 2001], Philosophie d'un retournement, Paris, Encre marine, 2001, 117p.
[Damien, R., 1995], Bibliothèque et État, Paris, PUF, 1995, 317p.
[Damien, R., 1998], François Dagognet médecin épistémologue philosophe – une philosophie à l'œuvre, collectif sous la direction de Robert Damien, Paris, Les empêcheurs de penser en rond, 1998, 303p.
[Debray, R., 1991, 2001], Cours de médiologie générale, Paris, Gallimard, 1991 ; réédition augmentée d'une postface : Paris, 2001, 555p.
[Debray, R., 1992, 2000], Vie et mort de l'image, Paris, Gallimard, 1992 ; Folio essais, 2000, 526p.
[Debru, C., 1998], Philosophie de l'inconnu : le vivant et la recherche, Paris, PUF, 1998, 443p.
[Delattre, P. et Thellier, M., 1979], Elaboration et justification des modèles, Actes du colloque de 1978, Paris, Maloine, 1979, 2 tomes.
[Deledalle, G., 1995], La philosophie peut-elle être américaine ?, Paris, J. Grancher, 1995, 304p.
[Deleuze, G., 1962, 1991], Nietzsche et la philosophie, 1ère édition : 1962, 8ème édition : 1991, Paris, PUF, 232p.
[Deleuze, G., 1969, 1982], Logique du sens, Paris, Editions de Minuit, 1969 ; réimpression : 1982, 392p.
[Deleuze, G., 1988], Le pli – Leibniz et le baroque, Paris, Editions de Minuit, 1988, 192p.
[Deleuze, G. et Guattari, F., 1980], Mille plateaux – Capitalisme et shizophrénie, Paris, Editions de Minuit, 1980, 645p.
[Deleuze, G. et Guattari, F., 1991], Qu'est-ce que la philosophie ?, Paris, Editions de Minuit, 1991, 207p.
[Deliège, C., 1995], « Du sérialisme à l'informatique musicale », in Les cahiers du Centre International de Recherches en Esthétique Musicale (CIREM), Université de Tours, 1995, pp. 67-80.
[Dennett, D.C., 1995a], "Artificial Life as Philosophy", in Artificial Life : an Overview, ed. by C. Langton, MIT Press, Cambridge, 291-292.
[Dennett, D.C., 1995b, 2000], Darwin's Dangerous Idea. Evolution and the Meanings of Life, Simon & Schuster, 1995; traduction : Darwin est-il dangereux ?, Paris, Odile Jacob, 2000, 657p.
[Desanti, J.T., 1968], Les idéalités mathématiques, Paris, Seuil, 1968, 319p.
[Desanti, J. T., 1975], La philosophie silencieuse ou critique des philosophies de la science, Paris, Seuil, 1975, 285p.
[Descamps, C., 1986], Les idées philosophiques contemporaines en France, Paris, Bordas, coll. Philosophie présente, 1986, 192p.
[Descombes, V., 1979], Le même et l'autre – Quarante-cinq ans de philosophie française (1933-1978), Paris, Editions de Minuit, 1979, 224p.
[Deutsch, D., 1997, 2003], The Fabric of Reality, London, Penguin Books, 1997 ; traduction : L'étoffe de la réalité, Paris, Cassini, 2003, 446p.
[Didi-Huberman, G., 1990, 2001], Devant l'image, Paris, Editions de Minuit, 1990 ; réimpression : 2001, 333p.
[Didi-Huberman, G., 1992], Ce que nous voyons et ce qui nous regarde, Paris, Editions de Minuit, 1992, 209p.
[Dilthey, W., 1883, 1942], Einleitung in die Geisteswissenschaften, Leipzig, 1883 ; traduction : Introduction à l'étude des sciences humaines, Paris, PUF, 1942, 525p.
[Dilthey, W., 1924, 1947], Die Geistige Welt, Leipzig & Berlin, 1924 ; traduction : Le monde de l'esprit, Tome I, Paris, Aubier, 426p.
[Di Paolo, E.A. *et al.,* 2000], "Simulation Models as Opaque Thought Experiments". In Artificial Life VII, Proc. of the 7th Intern. Conf. on Artificial Life, ed. by Mark A. Bedau *et al*., MIT Press, Cambridge, 497-506.
[Dieguez (de), M., 1981], L'idole monothéiste, Paris, PUF, 1981, 263p.
[Droit, R. P., 1990], Science et philosophie, pour quoi faire ?, Paris, Le Monde – éditions, 1990, 372p.
[Drouin, J. M., 1991], L'écologie et son histoire (réinventer la nature), Paris, Desclée de Brouwer, 1991, chapitre II : « Modèles », pp. 109-149 de l'édition Champs-Flammarion, 1993, 218p.
[Dubois, M., 1999], Introduction à la sociologie des sciences, Paris, PUF, coll. Premier Cycle, 321p.
[Dubucs, J., 2002], « Simulations et modélisations », Pour la science, n°300, octobre 2002, 3p.

[Dufourt, H., 1995], « Les fonctions paradigmatiques de la musique chez Leibniz », in Les cahiers du Centre International de Recherches en Esthétique Musicale (CIREM), Université de Tours, 1995, pp. 7-65.

[Duhem, P., 1914], La théorie physique – son objet – sa structure, Paris, 1914 ; réédition dans la collection Vrin, 1989.

[Dumas, R., 2002], Traité de l'arbre – essai d'une philosophie occidentale, Paris, Actes Sud, 2002, 256p.

[Dupuy, J. P., 2000], Les savants croient-ils en leur théorie ?, Paris, INRA-édition, 2000, 133p.

[Durand, G., 1964], L'imagination symbolique, Paris, PUF, coll. Initiation Philosophique, 1964, 129p.

[Durand, G., 1969, 1992], Les structures anthropologiques de l'imaginaire, Paris, Bordas, 1969 ; onzième édition : Paris, Dunod, 1992, 536p.

[Eco, U., 1962, 1965, 1979], Opera Aperta, Milan, Bompiani, 1962 ; traduction : L'œuvre ouverte, Paris, Seuil, 1965 ; réimpression : Seuil-Points, 1979, 316p.

[Eco, U., 1985, 1989], La guerre du faux, Paris, Grasset & Fasquelle, 1985 ; réimpression : Livre de Poche, Biblio-essais, 1989, 382p.

[Einstein, A., 1979, 1989], Comment je vois le monde, Traductions de diverses conférences d'Albert Enstien, sans présentation ni lieux ni dates, Paris, Flammarion, 1979 ; réimpression : Champs-Flammarion, 1989, 191p.

[Emery, A., 1934], "Dialectics versus Mechanics – A communist Debate on Scientific Method", Philosophy of Science, 1935, vol. 2, n°1, pp. 9-38.

[Engel, P., 1989], La norme du vrai – Philosophie de la logique, Paris, NRF essais, 1989, 492p.

[Engel, P., 1996], Philosophie et psychologie, Paris, Folio-essais, 1996, 473p.

[Engels, F., 1877-1878, 1963], Anti-Dühring, Paris, Editions Sociales, 1963, 511p.

[Engels, F., 1873-1876, 1925, 1952], La dialectique de la nature, manuscrits posthumes datant de 1873-1876, première édition à Moscou : 1925, Paris, Editions Sociales, 1952, 367p.

[Esterle, A. et Schaffar, L., 1994], Organisation de la recherche et conformisme scientifique, Paris, PUF, 1994, 327p.

[Fagot-Largeault, A., 2002], « L'explication dans les sciences de la vie et de la santé, 6 : Formes », 2 pages, plan détaillé et résumé du cours sur les formes dans les sciences de la vie, professé au Collège de France le 18 décembre 2002, accessible sur http://www.college-de-france.fr.

[Fatès, N., 2001], Les automates cellulaires : vers une nouvelle épistémologie ?, Mémoire de DEA d'histoire et de philosophie des sciences, sous la direction de J. Mosconi, Paris I, 2001, 51p., accessible sur http://nazim.fates.free.fr/.

[Faye, J. P., 1996, 2002], Le siècle des idéologies, Paris, Armand Colin/Masson, 1996 ; réédition : Armand Colin, coll. Pocket-Agora, 2002, 252p.

[Fedi, L. et Salanskis, J. M., 2001], Les philosophies françaises et la science : dialogue avec Kant, Cahiers d'Histoire et de Philosophie des Sciences, n°50, Paris, ENS éditions, 2001, 250p.

[Feltz, B., 1991], Croisées biologiques, Bruxelles, éditions Ciaco, 1991, 338p.

[Feltz, B., 1999], Auto-organisation et émergence dans les sciences de la vie, collectif dirigé par B. Feltz, M. Crommelinck et Ph. Goujon, Bruxelles, Ousia, 1999, 511p.

[Fenstad, J. E. *et al.*, 1989], Logic, Methodology and Philosophy of Science VIII, Proc. of the 8th International Congress for Logic, Methodology and Philosophy of Science, ed. by J. E. Fenstad, Elsevier Science Publishers, 1989.

[Ferry, L. et Renaut, A., 1986, 1988], La pensée 68 – Essai sur l'anti-humanisme contemporain, Paris, Gallimard, 1986 ; Gallimard, Folio-essais, 1988, 347p.

[Feyerabend, P., 1975, 1979, 1988], Against Method, London, New Left Books, 1975 ; traduction : Contre la méthode, Paris, Seuil, 1979 ; réédition : Seuil-Points, 1988, 350p.

[Fichant, M., 1973, 2000], « L'épistémologie en France », in Le XXème siècle – Histoire de la philosophie tome VIII, sous la direction de François Châtelet, 1ère édition : Paris, Librairie Hachette, 1973 ; deuxième édition : Paris, Hachette Littérature, collection Pluriel, 2000, pp. 135-178.

[Fichant, M. et Pécheux, M., 1969], Sur l'histoire des sciences, Paris, Maspéro, 1969.

[Foucault, M., 1966, 1990], Les mots et les choses, Paris, Gallimard, 1966 ; réimpression : TEL/Gallimard, 1990, 400p.

[Foucault, M., 1969, 1997], L'archéologie du savoir, Paris, Gallimard, 1969 ; réimpression : NRF/Gallimard, coll. Bibliothèque des sciences humaines, 1997, 279p.

[Franck, A., 2002], D'un usage de la pensée mathématique – Clinique psychanalytique d'une potentialité psychotique, Ramonville-Saint-Agne, éditions érès, 2002, 167p.

[Fréchet, M., 1955], Les mathématiques et le concret, Paris, PUF, 1955, 438p.

[Frege, G., 1892, 1971, 1994], « Sinn und Bedeutung », Zeitschrift für Philosophie und philosophische Kritik, 100, 1892 ; traduction et commentaire de cet article, « Sens et dénotation », par Claude Imbert, publié dans Ecrits logiques et philosophiques : Paris, Seuil, 1971 ; réimpression : Seuil/Points, 1994, pp. 102-126.

[Freud, S., 1913, 1965, 1979], Totem et tabou, écrit en 1913 ; traduction : Paris, Payot, 1965 ; réimpression : Payot, coll. Petite bibliothèque, 1979, 186p.

[Freudenthal, H., 1961], The Concept and the Role of the Model in Mathematics and Natural and Social Sciences, Proc. of the Colloquium sponsored by the Division of Philosophy of Sciences of the International Union of History and Philosophy of Sciences organized at Utrecht, January 1960, by Hans Freudenthal (dir.), Dordrecht, D. Reidel Publishing Company, 1961, 194p.

[Garaudy, R., 1966], La pensée de Hegel, Paris, Bordas, 1966, 208p.

[Giovannangeli, D., 2002], Finitude et représentation, Bruxelles, Ousia, 2002, 119p.

[Goffy, J. Y., 1988], La philosophie de la technique, Paris, PUF, 1988, 127p.

[Gohau, G., 1996], « Histoire des sciences du troisième type », Raison Présente, 3ème trimestre 1996, n°119, pp. 47-57.

[Gonseth, F., 1936, 1974], Les mathématiques et la réalité, nouveau tirage de l'édition de 1936, Paris, Albert Blanchard, 1974, 386p.

[Goodman, N., 1954, 1984], Fact, Fiction and Forecast, Indianapolis, Hackett Publishing Company, 1954 ; traduction : Faits, fiction et prédiction, Paris, Les éditions de minuit, 1984, 132p.

[Goodman, N., 1978, 1992], Ways of Worldmaking, Indianapolis, Hackett Publishing Company, 1978 ; traduction: Nîmes, éditions Jacqueline Chambon, 1992, 197p.

[Goody, J., 1997, 2003], Representations and Contradictions, Ambivalence Towards Images, Theatre, Fictions, relics and Sexuality, Blackwell Publisher (sans lieu), 1997 ; traduction : La peur des représentations : l'ambivalence à l'égard des images, du théâtre, de la fiction, des reliques et de la sexualité, Paris, Editions La Découverte, 2003, 310p.

[Granger, G. G., 1955, 1979], La raison, 1ère édition : 1955 ; 4ème édition : 1979, Paris, PUF, QSJ, 128p.

[Granger, G. G., 1960, 1967], Pensée formelle et sciences de l'homme, Paris, Aubier, 1960, 226p. ; 2ème édition : avec un avant-propos supplémentaire, 1967.

[Granger, G. G., 1968], Essai d'une philosophie du style, Paris, Armand Colin, 1968, 312p.

[Granger, G. G., 1979], Langages et épistémologie, Paris, Editions Klincksieck, 1979, 226p.

[Granger, G. G., 1988, 2003], « Simuler et comprendre », texte d'une conférence prononcée à Brighton en août 1988, in Philosophie, langage, science, Paris, EDP, 2003, pp. 187-192.

[Granger, G. G., 1992], La vérification, Paris, Odile Jacob, 1992, 314p.

[Granger, G. G., 1993, 1995], La science et les sciences, Paris, PUF, QSJ, 1993 ; 2ème édition corrigée : 1995, 127p.

[Granger, G. G., 1995], Le probable, le possible et le virtuel, Paris, Odile Jacob, 1995, 248p.

[Granger, G. G., 1994], Formes, opérations, objets, Paris, Vrin, 1994, 402p.

[Granger, G. G., 1999], La pensée de l'espace, Paris, Odile Jacob, 1999, 238p.

[Granger, G. G., 2000], Sciences et réalité, Paris, Odile Jacob, 262p.

[Gras, A., 1997], Les macro-systèmes techniques, Paris, PUF, QSJ, 1997, 128p.

[Gregg, J. R. et Harris, F. T. C., 1964], Form and Strategy in Science – Studies dedicated to Joseph Henry Woodger on the Occasion of his Seventieth Birthday, ed. by J. R. Gregg and F. T. C. Harris, Dordrecht, D. Redidel Publishong Company, 1964, 476p.

[Gros, F., 1990, 1992], L'ingénierie du vivant, Paris Odile Jacob, 1990 ; réédition : Seuil, coll. Points, 1992, 247p.

[Gualandi, A., 1998], Le problème de la vérité scientifique dans la philosophie française contemporaine, Paris, L'Harmattan, 1998, 256p.

[Gusdorf, G., 1960, 1974], Introduction aux sciences humaines, Strasbourg, Association des publications près les Universités de Strasbourg, 1960 ; nouvelle édition : Paris, Ophrys, 1974, 522p.

[Habermas, J., 1968, 1976, 1979], Erkenntnis und Interesse, Frankfurt am Main, Suhrkamp Verlag, 1968 ; traduction : Connaissance et intérêt, Paris, Gallimard, 1976, coll. Tel, 1979, 386p.

[Habermas, J., 1999a, 2000], « Hermeneutische und analytische Philosophie. Zwei komplementäre Spielarten der linguistischen Wende », in Wahrheit und Rechtfertigung, Frankfurt am Main, Suhrkamp Verlag, 1999 ; première traduction : «Philosophie herméneutique et philosophie analytique – Deux variantes complémentaires du tournant linguistique », Un siècle de philosophie 1900-200, Paris, Gallimard, Folio-Essais Inédit, 2000, pp. 177-230.

[Habermas, J., 1999b, 2001], Wahrheit und Rechtfertigung, Frankfurt am Main, Suhrkamp Verlag, 1999 ; traduction complète (dont l'article précédent) : Vérité et justification, Paris, Gallimard, NRF-essais, 2001, 348p.

[Hacking, I., 1983, 1989], Representing and Intervening, Cambridge University Press, 1983 ; traduction : Concevoir et expérimenter, Paris, Bourgois, 1989, 459p.

[Hacking, I., 1999, 2001], The Social Construction of What ?, Harvard University Press, 1999 ; traduction : Entre science et réalité – La construction sociale de quoi ?, Paris, La Découverte, 2001, 299p.

[Haldane, J. B. S., 1938, 1946], La Philosophie marxiste et les Sciences, traduction de conférences données en 1938 à l'Université de Birmingham, Paris, Editions Sociales, 1946, 245p.

[Hartmann, S., 1995], "Simulation", in Enzyklopädie Philosophie und Wissenschaftstheorie, vol. 3, Verlag Metzler, Stuttgart, pp. 807-809.

[Hartmann, S., 1996], “The World as a Process: Simulation in the Natural and Social Sciences”, in [Hegselmann, R., Mueller, U. et Troitsch, K., 1996], pp. 77-100.

[Hartmann, S., 1999], “Models and stories in hadron physics”, in [Morgan, M.S. et Morrison, M., 1999], pp. 326-346.

[Hayek (von), F., 1952], Scientism and the study of society, Glencoe, Illinois, The Free Press, 1952 ; traduction : Scientisme et sciences sociales, Paris, Plon, 1953 ; édition de poche : Paris, Agora, 1986, 186p.

[Hegel, G.W.F., 1807, 1939], La phénoménologie de l’Esprit, Tome I, trad. de Jean Hyppolite, Paris, Aubier, 1939, 358p.

[Hegselmann, R., Mueller, U. et Troitsch, K., 1996], Modelling and Simulation in the Social Sciences from the Philosophy of Science Point of View, ed. by R. Hegselmann *et al.*, Dordrecht, Boston, London, Kluwer Academic Publisher, 1996, 318p.

[Hempel, C., 1966, 1972], Philosophy of Natural Sciences, Englewood Cliffs, N. J., Prentice Hall, 1966 ; traduction : Eléments d’épistémologie, Paris, Armand Colin, 1972, 184p.

[Hesse, M. B., 1966], Models and Analogies in Science, Notre Dame, University of Notre Dame Press, 1966 ; 2nd printing : 1970, 184p.

[Hintikka, J., 1980, 1996], La philosophie des mathématiques chez Kant, 1ère édition en anglais (sans lieu) : 1980 ; traduction : Paris, PUF, 1996, 311p.

[Holton, G., 1973, 1978, 1981], The Scientific Imagination, (sans lieu), 1981, réunissant des travaux parus auparavant dans Thematic Origins of Scientific Thought : Kepler to Einstein, Cambridge (Mass.), Harvard University Press, 1973 et The Scientific Imagination : Case Studies, Cambridge University Press, 1978 ; traduction : L’imagination scientifique, Paris, NRF-Gallimard, 1981, 486p.

[Hottois, G., 1984], Le signe et la technique, Paris, Aubier, 1984, 222p.

[Hume, D., 1748, 1983], Philosophical Essays Concerning Human Understanding, London, 1748 ; traduction : Enquête sur l’entendement humain, Paris, Garnier-Flammarion, 1983, 252p.

[Humphreys, P., 1990] “Computer Simulations”, PSA (Philosophy of Science Association), 1990, vol. 2, pp. 497-506.

[Humphreys, P., 2002], “Computational Models”, in Philosophy of Science, 69 (September 2002), pp. S1-S11.

[Husserl, E., 1954, 1976], La crise des sciences européennes et la phénoménologie transcendantale, Martinus Nijhoff, La Haye, 1954 ; traduction : Paris, TEL/Gallimard, 1976, 589p.

[Hyppolite, J., 1953], Logique et existence, Paris, PUF/Epiméthée, 1953, 249p.

[Israel, G., 1996], La mathématisation du réel, Paris, Seuil, 1996, 368p.

[Israel, G., 2000], Le jardin au noyer, Paris, Seuil, 2000, 280p.

[Jacob, P., 1980], L’empirisme logique, Paris, Les éditions de minuit, 1980, 306p.

[James, W., 1907, 1968], Le pragmatisme, Harvard, 1907 ; traduction : Paris, Flammarion, 1968, 247p.

[Jorland, G., 1981], La science dans la philosophie – Les recherches épsitémologiques d’Alexandre Koyré, Paris, NRF-Gallimard, 1981, 374p.

[Kambouchner, D., 1995], « La culture », in Notions de philosophie, Tome III, Paris, Folio, coll. Essais, 1995, pp. 445-568.

[Kant, E., 1775-1781, 1993], Leçons de métaphysique, cours professés par Kant entre 1775 et 1781 : Paris, Librairie Générale Française, Livre de Poche, 1993, 474p.

[Kant, E., 1781, 1787, 1944, 1984], Critique de la Raison Pure, traduction de 1944 de A. Tremsaygues et B. Pacaud, Paris, PUF-Quadrige, 1984, 584p.

[Kant, E., 1790, 1989], Critique de la Faculté de Juger, 1790, traduction d’Alexis Philonenko : Paris, Vrin, 1989, 308p.

[Kaplan, F., 1995], Le paradoxe de la vie, Paris, La Découverte, 1995, 261p.

[Kasner, E., 1970], Mathematics and the Imagination, New York, Simon and Schuster, sans date ; traduction : Les mathématiques et l’imagination, Paris, Payot, coll. Bibliothèque scientifique, 1970, 252p.

[Keller, O., 1998], « Questions ethnographiques et mathématiques de la préhistoire », Revue de synthèse, Tome 119, 4ème série, n°4, octobre-décembre 1998, pp. 545-573.

[Kitcher, P., 1999], “The Hegemony of Molecular Biology“, Biology and Philosophy, vol. 14, 1999, pp. 195-210.

[Köhler, P., 1913], Der Begriff der Repräsentation bei Leibniz – Ein Beitrag zur Entstehungsgeschichte seines Systems, Bern, Verlag von A. Francke, 1913, 162p.

[Kojève, A., 1947, 1990], Introduction à une lecture de Hegel, Paris, 1947 ; réimpression : Tel/Gallimard, 1990, 599p.

[Kolakowski, L., 1966, 1976], Filozofia pozytywistyczna, Stuttgart, Geisenheyner & Crone, 1966 ; traduction : La philosophie positiviste, Paris, Denoël/Gonthier, coll. Médiations, 1976, 251p.

[Koyré, A., 1961], Etudes d’histoire de la pensée philosophique, Paris, Armand Colin, 1961, 329p.

[Kuhn, T., 1962, 1970, 1983], The Structure of Scientific Revolutions, Chicago, The University of Chicago Press, 1962 ; seconde édition augmentée : 1970 ; traduction : La structure des révolutions scientifiques, Paris, Flammarion, coll. Champs, 1983, 285p.

[Labarrière, P. J., 1968, 1985], Structures et mouvement dialectique dans la Phénoménologie de l’Esprit, Paris, Aubier, 1968 ; nouvelle édition : Paris, Aubier, 1985, 314p.

[Labarrière, P. J., 1979], Introduction à une lecture de la Phénoménologie de l’Esprit, Paris, Aubier, 1979, 287p.

[Laborit, H., 1974, 1995], La nouvelle grille, Paris, Robert Laffont, 1974 ; Gallimard, 343p.
[Laborit, H., 1976, 1996], Eloge de la fuite, Paris, Robert Laffont, 1976 ; Gallimard, 1996, 187p.
[Lacan, J., 1948, 1970, 1999], « L'agressivité en psychanalyse », conférence prononcée en 1948, publiée in Ecrits, Tome I, Paris, Seuil/Poche, 1970 ; réédition : 1999, pp. 100-123.
[Lakatos, I., 1978, 1986, 1994], The Methodology of scientific research programs (papiers posthumes de 1978), Cambridge, Cambridge University Press, 1986, trad. : Histoire et méthodologie des sciences (programmes de recherche et reconstruction rationnelle), sous la dir. de Luce Giard, PUF, Bibliothèque d'histoire des sciences, 1994, 268p.
[Lambert, D., 1999], « L'incroyable efficacité des mathématiques », La Recherche, n°316, janvier 1999, pp. 48-55.
[Largeault, J., 1989, 1995], « Description et explication », article de l'Encyclopadia Universalis, édition 1989, version CD-ROM, 1995, 13p.
[Larrère, C. et Larrère, R., 1997], Du bon usage de la nature – Pour une philosophie de l'environnement, Paris, Aubier, 1997, 355p.
[Lassègue, J., 1998a], « Turing, l'ordinateur et la morphogenèse », La Recherche, n°305, janvier 1998, pp. 76-77.
[Lassègue, J., 1998b], Turing, Paris, Les Belles Lettres, collection « figures du savoir », 1998, 210p.
[Laszlo, P., 1999], La découverte scientifique, Paris, PUF, QSJ, 128p.
[Latour, B., 1989, 1995], La science en action, Paris, La Découverte, 1989 ; nouvelle édition révisée par l'auteur et parue chez Gallimard, 1995, 663p.
[Latour, B., 1989, 1997], « Pasteur et Pouchet : hétérogenèse de l'histoire des sciences », in Eléments d'histoire des sciences, dir. par Michel Serres, Paris, Bordas, 1989 ; réimpression : Larousse/Bordas, 1997, pp. 669-663.
[Latour, B., 1991, 1997], Nous n'avons jamais été modernes, Paris, La Découverte, 1991 ; réimpression : La Découverte/Poche, 1997, 209p.
[Latour, B. et Woolgar, S., 1979, 1988], Laboratory Life. The Construction of Scientific Facts, 1979, Sage Publications, Inc.; traduction : La vie de laboratoire - La production des faits scientifiques, Paris, La Découverte, 1988, 300p.
[Laugier, S., 2001], Carnap et la construction logique du monde, collectif, S. Laugier éd., Paris, Vrin, 2001, 322p.
[Lautman, A., 1936], « Le congrès international de philosophie des sciences (du 15 au 23 septembre 1935) », Revue de métaphysique et de morale, vol. 43, n°1, 1936, pp. 113-129.
[Lautman, A., 1977], Essai sur l'unité des mathématiques et divers écrits, recueil posthume d'écrits divers, Paris, UGE 10/18, 1977, 319p.
[Lecourt, D., 1968, 2002], L'épistémologie historique de Gaston Bachelard, Mémoire de maîtrise de Dominique Lecourt, dir. par Georges Canguilhem, Paris, Vrin, 1968 ; onzième tirage augmenté d'une postface de l'auteur : 2002, 125p.
[Lecourt, D., 1972], Pour une critique de l'épistémologie, Paris, Maspero, 1972, 134p.
[Lecourt, D., 1981], L'ordre et les jeux – Le positivisme logique en question, Paris, Grasset, 1981, 348p.
[Lecourt, D., 1990], « De Bachelard au matérialisme historique », Paris, Revue de l'Arc, n° spécial sur Bachelard, Editions Duponchelle, sept. 1990, pp. 5-13.
[Lecourt, D., 1992], « De la nature comme fiction », conférence prononcée en avril 1992, reprise dans À quoi sert donc la philosophie ?, Paris, PUF, 1993, pp. 103-114.
[Lecourt, D., 2001], La philosophie des sciences, Paris, PUF, QSJ, 2001, 127p.
[Lefebvre, H., 1947], Logique formelle et logique dialectique, Paris, Editions Sociales, 1947, 291p.
[Lefebvre, H., 1957], La pensée de Lénine, Paris, Bordas, 1957, 356p.
[Lefebvre, H., 1965, 2001], Métaphilosophie, Paris, Editions de Minuit, 1965 ; réédition : Editions Syllepse, 2000, 303p.
[Lefebvre, H., 1971, 1975], Au-delà du structuralisme, Paris, Anthropos, 1971 ; modifié et réédité sous le titre : L'idéologie structuraliste, Paris, Seuil, coll. Points, 1975, 253p.
[Lefebvre, H., 2002], Méthodologie des sciences, inédit édité par Rémi Hess, Paris, Anthropos (diffusion par les éditions Economica), 2002, 225p.
[Legay, J. M., 1981], Qui a peur de la science ?, Paris Editions sociales, 1981, 249p.
[Le Lionnais, F., 1959 ?], La méthode dans les sciences modernes, n° hors-série de la revue « Travail et Méthodes » dirigé par F. Le Lionnais, Paris, Editions Science et Industrie, sans date : 1959 probablement, 343 p.
[Lénine, V. I., 1908, 1973], Matérialisme et empiriocriticisme, Moscou, Editions du progrès, 1908 ; traduction : Editions sociales, Paris, 1973, 383p.
[Lénine, V. I., 1894-1923, 1978, 1982], Textes philosophiques, choix de textes de 1894 à 1923, traduits et publiés une première fois en 1978; traduction remaniée et republiée en 1982, Paris, Editions Sociales, collection Essentiel, 1982, 311p.
[Lévy, P., 1987], La machine univers – Création, cognition et culture informatique, Paris, La Découverte, 1987, réédition Seuil – Point Sciences, 1992, 240p.
[Lévy, P., 1990], Les technologies de l'intelligence – L'avenir de la pensée à l'ère informatique, Paris, La Découverte, 1990, réédition Seuil – Point Sciences, 1993, 235p.

[Lévy, P., 1998], Qu'est-ce que le virtuel ?, Paris, La Découverte, 1998, 154p.
[Löwith, K., 1949, 1953, 2002], Meaning and History, Chicago, Chicago University Press, 1949; version allemande définitive : Weltgeschichte und Heilsgeschehen. Die theologischen Vorraussetzungen der Geschichtsphilosophie, Stuttgart, 1953 ; traduction : Histoire et salut. Les présupposés théologiques de la philosophie de l'histoire, Paris, Gallimard, 2002, 287p.
[Lyotard, J. F., 1971, 1978], Discours, figure, Paris, Editions Klincksieck, 1ère édition : 1971, troisième tirage : 1978, 428p.
[Lyotard, J. F., 1973], Dérive à partir de Marx et Freud, Paris, UGE, coll. 10/18, 1973, 317p.
[Lyotard, J. F., 1979], La condition post-moderne, Paris, Editions de minuit, 1979, 109p.
[Mach, E., 1883, 1904, 1987], Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch-kritisch dargestellt, Leipzig, 1883 ; traduction : La mécanique, exposé historique et critique de son développement, Paris, 1904 ; réimpression : Paris, Jacques Gabay, 1987, 498p.
[Mach, E., 1905, 1908], Erkenntnis und Irrtum, Leipzig, 1905 ; traduction : La connaissance et l'erreur, Paris, Ernest Flammarion, 1908, 392p.
[Mach, E., 1911, 1922, 1996], Analyse der Empfindungen, Iéna, 1911, 1922 ; traduction de l'édition définitive et posthume de 1922 : L'analyse des sensations – le rapport du physique au psychique, Paris, Editions Jacqueline Chambon, 1996, 323p.
[Mainzer, K., 1997], Thinking in Complexity, Berlin, Heidelberg, New-York, Springer Verlag, 1997 (3rd edition ; 1rst edition : 1994), 361p.
[Marion, J. L., 1977, 1991], L'idole et la distance, Paris, Editions Grasset & Fasquelle, 1977 ; réimpression : Paris, Livre de Poche, coll. Biblio-essais, 1991, 316p.
[Marquard, O., 1973, 2002], Schwierigkeiten mit der Geschichtsphilosophie, Frankfurt am Main, 1973 ; traduction : Des difficultés avec la philosophie de l'histoire, Paris, Editions de la Maison des Sciences de l'Homme, 2002, 172p.
[Martin, T., 1996], Probabilités et critique philosophique selon Cournot, Paris, Vrin/Mathesis, 1996, 362p.
[Marx, K. et Engels, F., 1845-1846, 1977], L'idéologie allemande, Tome premier (première partie) : Feuerbach, précédée des « Thèses sur Feuerbach » de Karl Marx, Paris, Editions sociales, 1977, 143p.
[Marx, K. et Engels, F., 1851-1895, 1974], Lettres sur les sciences de la nature, lettres écrites entre 1851 et 1895, Paris, Editions sociales, 1974, 158p.
[Matoré, G., 1962], L'espace humain, Paris, La Colombe, 1962, 299p.
[Meyerson, E., 1907, 1932], Identité et réalité, Paris, Félix Alcan, 1907 ; 4ème édition : 1932, 571p.
[Meyerson, E., 1925, 1992], La déduction relativiste, Paris, Payot, 1925 ; réimpression : Paris, Editions Jacques Gabay, 1992, 396p.
[Michaud, Y., 2003], Le Renouvellement de l'observation dans les sciences, Université de tous les savoirs (UTLS), collectif dirigé par Yves Michaud, Paris, Odile Jacob, 2003, 282p.
[Miller, A. I., 1996, 2000], Imagery and Creativity in Science and Art, New-York, Springer Verlag, 1996 ; traduction : Intuitions de génie – Images et créativité dans les sciences et les arts, Paris, Flammarion, 2000, 457p.
[Moles, A. A., 1995], Les sciences de l'imprécis, Paris, Seuil, coll. Points-Sciences, 1995, 360p.
[Mondzain, M. J., 1996], Image, icône, économie – Les sources byzantines de l'imaginaire contemporain, Paris, Seuil, coll. L'ordre philosophique, 1996, 299p.
[Monod, J. C., 2002], La querelle de la sécularisation de Hegel à Blumenberg, Paris, Vrin, 2002, 317p.
[Morgan, M.S. et Morrison, M., 1999], Models As Mediators, ed. by M.S. Morgan and M. Morrison, Cambridge, Cambridge University Press, 1999, 401p.
[Morin, E., 1977, 1981], La méthode – 1. La Nature de la Nature, Paris, Seuil, 1977 ; Points-Seuil, 1981, 412p.
[Morin, E., 1980, 1985], La méthode – 2. La Vie de la Vie, Paris, Seuil, 1977 ; Points-Seuil, 1981, 482p.
[Morin, E., 1991], La méthode – 4. Les idées, Paris, Seuil, 1991, Points-Seuil, 1995, 264p.
[Mosconi, J., 1989], La constitution de la théorie des automates, Thèse de doctorat d'Etat, sous la direction de Suzanne Bachelard, Paris, I, 1989.
[Mouloud, N., 1968], Les structures, la recherche et le savoir, Paris, Payot, 1968, 307p.
[Mouloud, N., 1969], Langages et structures, Paris, Payot, 1969, 252p.
[Nadeau, R., 1999], Vocabulaire technique et analytique de l'épistémologie, Paris, PUF, collection premier cycle, 1999, 863p.
[Nagel, E., 1960, 1979], The Structure of Science, 1ère edition : 1960, Indianapolis, Hackett Publishing Company ; réédition : 1979, 618p.
[Nancy, J. L., 2001], L'art et la mémoire des camps – Représenter exterminer, n°36 de la revue Genre Humain, dir. par Jean-Luc Nancy, Paris, Seuil, 134p.
[Neyrat, F., 2003], L'image hors-l'image, Paris, Editions Léo Scheer, coll. Manifeste, 2003, 221p.
[Nicolis, G. et Prigogine, I., 1989], Exploring complexity : An introduction, Munich, KG Verlag ; traduction : À la rencontre du complexe, Paris, PUF, 1992, 382p.
[Nietzsche, F., 1993, Tome I], Œuvres, Tome I, Paris, Robert Laffont, coll. Bouquins, 1993, 1552p.
[Nietzsche, F., 1993, Tome II], Œuvres, Tome II, Paris, Robert Laffont, coll. Bouquins, 1993, 1792p.

[Normand, C., 1976], Métaphore et concept, Bruxelles, Editions Complexe, 1976, 162p.

[Nouvel, P., 2002], Enquête sur le concept de modèle, coll. dirigé par Pascal Nouvel, Paris, PUF, 2002, 246p.

[Ortigues, E., 1962, 1977], Le discours et le symbole, Paris, Aubier, coll. philosophie de l'esprit, 1962, réimpression en 1977, 230p.

[Panza, M. et Pont, J. C., 1992], Espace et horizon de réalité – Philosophie mathématique de Ferdinand Gonseth, Paris, Masson, 1992, 194p.

[Papaionnou, K., 1965, 1975], Marx et les marxistes, Paris, Flammarion, 1972, 505p.

[Parain-Vial, J., 1985], Philosophie des sciences de la nature, Paris, Klincksieck, 2ème édition refondue : 1985, 269p.

[Parrochia, D., 1990], « Quelques aspects épistémologiques et historiques des notions de « système » et de « modèle » », in [CNRS, 1990], pp. 215-233.

[Parrochia, D., 1991], Mathématiques et existence, Paris, Champ Vallon, 253p.

[Parrochia, D., 1992], Qu'est-ce que penser/calculer ?, Paris, Vrin, coll. Pré-textes, 1992, 128p.

[Parrochia, D., 1993a], La raison systématique, Paris, Vrin, 1993, 320p.

[Parrochia, D., 1993b], Philosophie des réseaux, Paris, PUF, 1993, 300p.

[Parrochia, D., 1994], Cosmologie de l'information – Pour une nouvelle modélisation de l'univers informationnel, Paris, Hermès, 1994, 282p.

[Parrochia, D., 1997], Les grandes révolutions scientifiques du XXème siècle, Paris, PUF, 1997, 434p.

[Parrochia, D., 1998], La conception technologique, Paris, Hermès, 1998, 269p.

[Parrochia, D., 2000], « L'expérience dans les sciences : modèles et simulation », in Qu'est-ce que la vie ?, conférence du 15 janvier 2000, Université de tous les savoirs, Paris, Odile Jacob, 2000, pp. 193-203.

[Parrochia, D., 2001], « Algorithmique et complexité : les limites de l'informatique », Annales d'histoire et de philosophie du vivant, vol. 5, Paris, Seuil, 2001, pp. 143-173.

[Pasternak, G. P., Ponthieu, G. et Treguer, M., 1987], Création et désordre, collectif, transcription d'entretiens diffusés sur France Culture avec des chercheurs contemporains, préface de M. Cazenave, Paris, L'originel, 1987, 173p.

[Patocka, J., 1968, 2001], „Husserls Anschauungsbegriff und das Urphänomen der Sprache", Archives du 14ème Congrès International de Philosophie, Vienne, 1968, chapitre 8 ; réimpression et traduction par Philippe Merlier : « Le concept d'intuition chez Husserl et le protophénomène du langage », Recherches Husserliennes, 2001, vol. 16, pp. 3-12.

[Pestre, D., 1996], « Les "Social Studies of Science" », Raison Présente, 3ème trimestre 1996, n°119, pp. 35-46.

[Petitot, J., 1985], Morphogenèse du sens - I, Paris, PUF, 1985, 306p.

[Petitot, J., 1988], Logos et théorie des catastrophes, Actes du colloque international de 1982 « À partir de l'œuvre de René Thom » éd. par J. Petitot, Genève, Editions Patino, coll. Colloques de Cerisy, 1988, 515p.

[Petitot, J., 1989, 1995], « Forme », article de l'édition de l'Encylopaedia Universalis de 1989, 39 pages sur la version CD-ROM de 1995.

[Petitot, J., 1992, 2000], Physique du sens – De la théorie des singularités aux sructures sémio-narratives, Paris, CNRS Editions, 1992 ; réimpression : 2000, 449p.

[Petitot, J., Varela, F. J., Pachoud, B. et Roy, J. M., 1999, 2002], Naturalizing Phenomenology : Issues in Contemporary Phenomenology and Cognitive Science, Stanford University Press, 1999 ; version française : Naturaliser la phénoménologie – Essai sur la phénoménologie contemporaine et les sciences cognitives, Paris, CNRS Editions, coll. Communication, 2002, 793p.

[Piaget, J., 1967], « La représentation 'concrète' », in Logique et connaissance scientifique, collectif sous la dir. de Jean Piaget, Paris, Pléiade, 1967, pp. 772-778.

[Piaget, J., 1970], Psychologie et épistémologie, Paris, Editions Denoël-Gonthier, 1970, 189p.

[Piaget, J., 1970, 1972], L'épistémologie génétique, Paris, PUF, QSJ, 1ère édition : 1970, 2ème édition : 1972, 127p.

[Pierobon, F., 2003], Kant et les mathématiques, Paris, Vrin, 2003, 240p.

[Poincaré, H., 1902, 1968, 1989], La science et l'hypothèse, Paris, 1902, réédition présentée par Jules Vuillemin : 1968, réimpression en Champs-Flammarion, 1989, 252p.

[Pommier, G., 2004], Qu'est-ce que le réel ?, Paris, Editions érès, 2004, 146p.

[Popper, K., 1934, 1959, 1968, 1973], The Logic of Scientific Discovery, première édition en allemand : Vienne, 1934 ; deuxième édition, en anglais : London, Hutchinson Co., 1959, puis 1968 ; traduction : La logique de la découverte scientifique, Paris, Payot, 1973, 480p.

[Popper, K., 1956, 1976, 1988], The Poverty of Historicism, premier article publié en 1956 dans Economica ; neuvième édition remaniée : The Poverty of Historicism, London, Routledge & Kegan, 1976 ; traduction française de 1956 reprise par R. Bouveresse : Misère de l'historicisme, Paris, Plon, coll. Pocket-Agora, 1988, 211p.

[Popper, K., 1963, 1985], Conjectures and Refutations, London, Routledge and Kegan, 1963 ; traduction : Conjectures et réfutations, Paris, Payot, 1985, 610p.

[Popper, K., 1972, 1991, 1998], Objective Knowledge, Oxford, Oxford University Press, 1972 puis 1979 ; traduction : Paris, Aubier, 1991 ; édition de poche : Champs-Flammarion, 1998, 578p.
[Poulain, J., 1993], La loi de vérité ou la logique philosophique du jugement, Paris, Albin Michel, coll. Bibliothèque du Collège international de philosophie, 1993, 266p.
[Prawitz, D. *et al*., 1994], Logic, Methodology and Philosophy of Science IX, Proc. of the 9th International Congress for Logic, Methodology and Philosophy of Science, ed. by D. Prawitz, B. Skyrms and D. Westerstahl, Elsevier Science, 1994.
[Prenant, M., 1935], Biologie et marxisme, Paris, Editions Sociales Internationales, 1935.
[Prigogine, I., 1996, 2001], La fin des certitudes – Temps, chaos et lois de la nature, Paris, Poches Odile Jacob, 1996, 230p.
[Prigogine, I. et Stengers, I., 1979], La nouvelle alliance, Paris, Gallimard, 1979, 443p.
[Prigogine, I. et Stengers, I., 1992], Entre le temps et l'éternité, Paris, Arthème Fayard, 1988 ; 2ème édition : Flammarion, 1992, 223p.
[Proust, J. et Schwartz, E., 1995], La connaissance philosophique – Essais sur l'œuvre de Gilles-Gaston Granger, Paris, PUF, coll. Modernités, 1995, 357p.
[Quéau, P., 1986], Eloge de la simulation, Paris, Champ-Vallon, coll. « Milieux », 1986, 260p.
[Quéau, P., 1994], Le virtuel, Paris, Champ Vallon, coll. « Milieux », 1994, 217p.
[Raison Présente, 1972], Epistémologie et marxisme, recueil d'articles parus dans Raison Présente, Paris, UGE, 10/18, 1972, 313p.
[Rancière, J., 1974], La leçon d'Althusser, Paris, Gallimard, coll. Idées, 1974, 277p.
[Reichenbach, H., 1951], The Rise of Scientific Philosophy, Berkeley, University of California Press, 1951, 333p.
[Renault, E., 2001], Hegel – La naturalisation de la dialectique, Paris, Vrin, 2001, 320p.
[Rescher, N., 1978], Scientific Progress, Basil Blackwell, 1978 ; traduction : Le progrès scientifique, Paris, PUF, 1993, 342p.
[Rescher, N., 2000], "Can Computers Overcome Our Limitations ?", in [Konstanz/Pittsburgh, 2000], pp. 110-134.
[Resweber, J. P., 1981], La méthode interdisciplinaire, Paris, PUF, coll. « Croisées », 1981, 175p.
[Rey, O., 2003], Itinéraire de l'égarement – Du rôle de la science dans l'absurdité contemporaine, Paris, Seuil, 2003, 333p.
[Rickert, H., 1926, 1997], Kulturwissenschaft und Naturwissenschaft, J.C.B. Mohr (Paul Siebeck), 1926 ; Sciences de la culture et sciences de la nature, Paris, Gallimard, 1997, 294p.
[Ricœur, P., 1965, 2001], De l'interprétation – Essai sur Freud, Paris, Seuil, 1965 ; réédition : Paris, Seuil, coll. Points, 2001, 582p.
[Ricœur, P., 1975, 1997], La métaphore vive, Paris, Seuil, coll. L'ordre philosophique, 1975 ; réédition : Paris, Seuil, coll. Points, 1997, 414p.
[Ricœur, P., Azouvi, F. et de Launay, M., 1995], La critique et la conviction, Paris, 1995, Hachette-Littérature, coll. Pluriel, 289p.
[Rohrlich, F., 1990], "Computer Simulation in the Physical Sciences", PSA (Philosophy of Science Association), 1990, vol. 2, pp. 507-518.
[Rosental, C., 1998], « Histoire de la logique floue : une approche sociologique des pratiques de démonstration », Revue de synthèse, Tome 119, 4ème série, n°4, octobre-décembre 1998, pp. 575-602.
[Rosset, C., 1976, 1984], Le réel et son double, Paris, Gallimard, 1976 ; 2ème édition augmentée : Paris, Gallimard, 1984, Folio-essais, 131p.
[Rosset, C., 1977, 2004], Le réel – Traité de l'idiotie, Paris, Editions de Minuit, 1977 ; réédition : Paris, Editions de Minuit, coll. Reprise, 2004, 155p.
[Rosset, C., 1979], L'objet singulier, Paris, Editions de Minuit, 1979, 109p.
[Ruyer, R., 1954], La cybernétique et l'origine de l'information, Paris, Flammarion, 1954, 237p.
[Saint-Sernin, B., 1995], La raison au XXème siècle, Paris, Seuil, 1995, 319p.
[Saint-Sernin, B., 2000], Whitehead - Un univers en essai, Paris, Vrin, coll. Analyse et philosophie, 2000, 208p.
[Salanskis, J. M., 1998], Husserl, Paris, Les Belles Lettres, coll. « Figures du savoir », 1998, 119p.
[Salanskis, J. M., 2001], « Kant, la science et l'attitude scientifique », in [Fédi, L. et Salanskis, J. M., 2001], pp. 199-235.
[Salanskis, J. M. et Sinaceur, H., 1992], Le labyrinthe du continu, Colloque de Cerisy de 1991, Springer Verlag, 1992.
[Salomon, J. J., 1970], Science et politique, Paris, Seuil, coll. « Esprit », 1970, 406p.
[Sartre, J. P., 1946, 1996], L'existentialisme est un humanisme, Paris, Nagel, 1946 ; réédition : Paris, Gallimard, coll. Folio-Essais, 1996, 113p.
[Scardigli, V., 2001], Un anthropologue chez les automates, Paris, PUF, « Sociologie d'aujourd'hui », 2001, 245p.
[Schaff, A., 1964, 1969, 1974], Langage et connaissance, paru en polonais en 1964 ; 1ère édition traduite : Paris, Anthropos, 1969 ; réimpression en Points/Anthropos, 1974, 251p.
[Schlanger, Jacques, 1983], L'activité théorique, Paris, Vrin, 1983, 134p.
[Schlanger, Judith, 1971, 1995], Les métaphores de l'organisme, Paris, Vrin, 1971 ; réimpression : L'Harmattan, Histoire des Sciences Humaines, 1995, 272p.

[Schlanger, Judith, 1983], L'invention intellectuelle, Paris, Fayard, 277p.
[Schmid, A. F., 1998], L'âge de l'épistémologie, Paris, Kimè, 1998, 289p.
[Schmitz, F., 1999], Wittgenstein, Paris, Belles Lettres, coll. Figures du savoir, 1999, 178p.
[Schüssler, I., 2003], Hegel et les rescendances de la métaphysique, Lausanne, Editions Payot-Lausanne, 2003, 355p.
[Sebag, L., 1964, 1973], Marxisme et structuralisme, Paris, Payot, 1964 ; réimpression : Petite Bibliothèque Payot, 1973, 265p.
[Séris, J. -P., 1994, 2000], La technique, Paris, PUF, 1ère édition : 1994, 1ère édition dans la collection PUF-Philosopher : 2000, 414p.
[Serres, M., 1972], Hermès II – L'interférence, Paris, Minuit, 1972, 237p.
[Serres, M., 1974], Hermès III – La traduction, Paris, Minuit, 1974, 271p.
[Serres, M., 1981], Hermès V – Le passage du nord-ouest, Paris, Minuit, 1981, 197p.
[Serres, M. et Latour, B., 1992, 1994], Eclaircissements, Paris, François Bourin, 1992 ; réédition : Champs-Flammarion, 1994, 299p.
[Serres, M., 1997], « Préface », in Le Trésor : dictionnaire des sciences, sous la direction de Michel Serres et Nayla Farouki, Flammarion, 1997, 1092p.
[Sève, L., 1998], Sciences et dialectiques de la nature, Paris, La Dispute, 1998, 419p.
[Sfez, L., 1988, 1992], Critique de la communication, Paris, Seuil, 1988, Points-Seuil, 1992, 527p.
[Sicard, M., 1998], La fabrique du regard, Paris, Editions Odile Jacob, coll. Le champ médiologique, 1998, 275p.
[Simondon, G., 1958, 1969, 1989], Du mode d'existence des objets techniques, Paris, Aubier, 1ère édition : 1958, édition augmentée : 1989, 336p.
[Sokal, A. et Bricmont, J., 1997], Impostures intellectuelles, Paris, Odile Jacob, 1997, 276p.
[Soler, L., 2000], Introduction à l'épistémologie, Paris, Ellipses, 2000, 240p.
[Sorensen, R. A., 1992], Thought Experiments, Oxford-New-York, Oxford University Press, 1992, 318p.
[Spengler, O., 1918-1922, 1947-1948], Der Untergang des Abendlandes, Vienne, 1917, édition définitive : 2 tomes, Munich, 1922 ; traduction : Le déclin de l'occident, 2 tomes, Paris, Gallimard, 1947, 413p. et 1948, 469p.
[Steiner, G., 1971, 2002], Extraterrritorial – Papers on Literature and the Language Revolution, New York, Atheneum, 1971; traduction : Extraterritorialité, Paris, Calmann-Lévy, 2002, 259p.
[Steiner, G., 1989, 1991, 1994], Real Presences. Is there anything *in* what we say ?, London, Faber and Faber, 1989 ; traduction : Réelles présences. Les arts du sens, Paris, Gallimard, 1991 ; réédition : Folio-essais, 1994, 283p.
[Stengers, I., 1993, 1995], L'invention des sciences modernes, Paris, La Découverte, 1993 ; Champs-Flammarion, 1995, 211p.
[Stengers, I., 1997], Cosmopolitiques VI – La vie et l'artifice : visages de l'émergence, La découverte/Les empêcheurs de penser en rond, Paris ; cf. particulièrement chapitre 5 : « l'art des modèles », pp. 100-124.
[Stöckler, M., 2000], "On Modeling and Simulations as Instruments for the Study of Complex System", in [Konstanz/Pittsburgh, 2000], pp. 355-373.
[Suppes, P. *et al.*, 1973], Logic, Methodology and Philosophy of Science IV, Proc. of the 4th International Congress for Logic, Methodology and Philosophy of Science, Bucharest, 1971, ed. by P. Suppes, L. Henkin, A. Joja and G. R. C. Moisil, Amsterdam, North Holland Publishing Company, 1973.
[Suppes, P., 1981], Logique du probable, Paris, Flammarion, Nouvelle Bibliothèque Scientifique, 136p.
[Teilhard de Chardin, P., 1955, 1990], Le phénomène humain, Paris, Seuil, 1955 ; France Loisirs, 1990, 343p.
[Teissier, G., 1936], « La description mathématique des faits biologiques », Revue de métaphysique et de morale, vol. 43, n°1, 1936, pp. 55-87.
[Teissier, G., 1946], Matérialisme dialectique et biologie, Paris, Editions Sociales, 1946.
[Theobald, D. W., 1968], An Introduction to the Philosophy of Science, London, Methuen & Co. Ltd., 1968, 145p.
[Thom, R., 1980], Paraboles et catastrophes, Milan, Il Saggiatore, 1980 ; version française : Flammarion, 1983, 189p.
[Thom, R., 1987], « Quantitatif et qualitatif en modélisation », in Biologie et Economie, éd. par J. Demongeot et P. Malgrange, Dijon, Librairie de l'Université de Bourgogne, 1987, pp. 15-22.
[Thom, R., 1988], Esquisse d'une sémiophysique, Paris, InterEditions, 1988, 285p.
[Thom, R., 1990], Apologie du logos, Paris, Hachette, 1990, 661p.
[Thom, R., Noël, E., 1991], Prédire n'est pas expliquer, entretiens avec Emile Noël, Paris, Flammarion, 1991, 175p.
[Thompson, P., 1999], « Le rôle des modèles mathématiques dans la formalisation des systèmes auto-organisés », in [Feltz, 1999], pp. 421-438.
[Thuillier, P., 1969], « L'épistémologie des modèles est-elle bourgeoise ? », Atomes, n°269, vol. 24, octobre 1969, pp. 626-631.
[Tibon-Cornillot, M., 1986], « De la simulation du vivant à sa manipulation : approche contemporaine de l'origine biologique des techniques », in [Wolkowski, Z. B., 1986], pp. 159-178.

[Tibon-Cornillot, M., 1992], Les corps transfigurés – Mécanisation du vivant et imaginaire de la biologie, Paris, Seuil, coll. Science ouverte,1992, 318p.

[Tiercelin, C., 2002], Hilary Putnam, l'héritage pragmatiste, Paris, PUF, coll. Philosophies, 2002, 126p.

[Tinland, F., 1991], Systèmes naturels / Systèmes artificiels, collectif sous la dir. de F. Tinland, Paris, Champ-Vallon, coll. Milieux, 1991, 252p.

[Ullmo, J., 1969], La pensée scientifique moderne, Paris, Flammarion, 1969, 315p.

[Vaihinger, H., 1911, 1935], Die Philosophie des « als ob », 1ère édition : Berlin, 1911 ; traduction de la 6ème édition : The Philosophy of « As If », London, Paul Kegan, 1935, 370p.

[Van Fraassen, B. C., 1989], Laws and Symmetry, Oxford, Oxford University Press, 1989 ; traduction par C. Chevalley : Lois et symétrie, Paris, Vrin, coll. Mathesis, 1994, 520p.

[Vandendorpe, C., 1999], Du papyrus à l'hypertexte - Essai sur les mutations du texte et de la lecture, Paris, La Découverte, coll. Sciences et société, 1999, 271p.

[Varenne, F., 2001], "What does a Computer Simulation Prove ? The Case of Plant Modeling at CIRAD (France)", in [ESS, 2001], p. 549-554.

[Varenne, F., 2003a], « La simulation conçue comme expérience concrète », Actes des 10èmes journées de rencontres interdisciplinaires sur les systèmes complexes naturels et artificiels (Rochebrune, janvier 2003) portant sur Le statut épistémologique de la simulation, organisées par l'European Conference on Artificial Life (ECAL) et par l'Association pour la Recherche Cognitive (ARCO), éditions de l'Ecole Nationale des Télécommunications de Paris (ENST), pp. 299-313.

[Varenne, F., 2004a], « Bachelard avec la simulation informatique : nous faut-il reconduire sa critique de l'intuition ? », Actes du colloque « Confiance raisonnée et défiance rationnelle : la surveillance intellectuelle de soi à partir de l'œuvre de Bachelard », Université de Besançon, 12-13 décembre 2002, à paraître aux Presses Universitaires de Franche-Comté, coll. Annales littéraires, série Agon, 45p.

[Varenne, F., 2005], « De la perte du réel au retour du sens commun », Natures Sciences Sociétés, à paraître en 2005.

[Vergnioux, A., 2003], L'explication dans les sciences, Bruxelles, De Boeck Université, 2003, 240p.

[Verley, X., 1998], Mach, un physicien philosophe, Paris, PUF, coll. Philosophies, 1998, 132p.

[Viennot, L. et Debru, C., 2003], Enquête sur le concept de causalité, Paris, PUF/Science, histoire et société, 2003, 207p.

[Virilio, P., 1984], L'espace critique, Paris, Christian Bourgois, 191p.

[Vuillemin, J., 1955, 1987], Physique et métaphysique kantiennes, Paris, PUF, 1ère édition : 1955, 2ème édition : 1987, 363p.

[Wagner, P., 2002a], « Qu'est-ce que la théorie des modèles ? », in [Nouvel, P., 2002], pp. 7-28.

[Wagner, P., 2002b], Les philosophes et la science, collectif sous la direction de Pierre Wagner, Paris, Gallimard, Folio-essais inédit, 2002, 1124p.

[Ward Bynum, T. and Moor, J. H., 1998, 2000], The Digital Phoenix – How Computers Are Changing Philosophy, ed. by T. Ward Bynum and J.H. Moor, 1st published: 1998, revised edition: 2000, Oxford, Blackwell Publishers Ltd, 414p.

[Watier, P., 2002], Une introduction à la sociologie compréhensive, Belfort, Circé, 2002, 182p.

[Weber, M., 1951, 1965, 1992], Essais sur la théorie de la science, Tübingen, publié en allemand en 1951 ; traduction : Paris, Plon, 1965 ; réimpression : Paris, Presses Pocket, 1992, 479p.

[Weyl, H., 1949, 1963], Philosophy of Mathematics and Natural Sciences, Princeton University Press (1949), reprinted by Athenaeum (1963), New York, 1963, 312p.

[Whitehead, A. N., 1929, 1995], Process and Reality, London, Macmillan Publishing, 1929 ; traduction : Procès et réalité – Essai de cosmologie, Paris, Gallimard NRF, 1995, 579p.

[Whitehead, A. N. et Russell, B., 1910, 1962, 1970], Principia Mathematica to 56, London, Cambridge University Press, 1910 ; édition abrégée : 1962 ; réimpression de cette édition : 1970, 410p.

[Winnicott, D.W., 1971, 1975, 2002], Playing and Reality, (sans lieu), 1971 ; traduction : Jeu et réalité, Paris, Gallimard, 1975 ; réédition en Folio-essais, 2002, 277p.

[Winsberg, E., 2003], "Simulated Experiments : Methodology for a Virtual World", Philosophy of Science, 70 (January 2003), pp. 105-125.

[Wittgenstein, L., 1922, 1961, 1990], Tractatus logico-philosophicus suivi des Investigations philosophiques, traduction de la version anglaise de 1922 (sans lieu) : Paris, Gallimard, 1961 ; réimpression : TEL-Gallimard, 1990, 365p.

[Wolff, E., 1963], Les chemins de la vie, Paris, Hermann, 1963, 239p.

[Wunenburger, J. J., 2003], Bachelard et l'épistémologie française, Paris, PUF, coll. débats philosophiques, 2003, 213p.

BIBLIOGRAPHIE ALPHABETIQUE

[Abelson, H., 1976], “Logo graphics as a mathematical environment”, Proc. of the Annual Conference of the Association of Computing Machinery, ACM-CSC-ER, Houston, ACM-Press, 1976, pp. 159-163.

[Abir-Am, P., 1987], “The Biotheoretical Gathering, Transdisciplinary Authority and the Incipient Legitimation of Molecular Biology in the 1930’s : New Perspective on the Historical Sociology of Science”, History of Science, 1987, vol. 25, pp. 1-70.

[Abunawass, A. M., 1992], “Biologically Based Machine Learning : An Introductory Course”, ACM SIGCSE Bulletin, vol. 24, n°1, 1992, pp. 87-91.

[Achinstein, P., 1968, 1971], Concepts of Science – A philosophical analysis, Baltimore and London, The Johns Hopkins Press, 1968 ; Johns Hopkins Paperbacks edition, 1971, 266p.

[Acot, P., 1987], « L’idéologie organiciste dans l’histoire récente de l’écologie (1905-1942) », Cahiers d’Histoire et de Philosophie des Sciences, nouvelle série, n°22, 1987, pp. 73-85.

[Acot, P., 1988], Histoire de l’écologie, Paris, PUF, 1988, 285p.

[Acot, P., 1999], L’histoire des sciences, Paris, PUF, QSJ, 1999, 128p.

[Adami, C., 1998], Introduction to Artificial Life, New York, Springer Verlag, collection Telos, 1998, 374p. et un CD-ROM.

[Adler, I., Barabe, D. et Jean, R. V., 1997], “A History of the Study of Phyllotaxis”, Annals of Botany, 1997, vol. 80, pp. 231-244.

[Agard, J *et al*., 1968], Les méthodes de simulation, Paris, Dunod, Monographies de Recherche Opérationnelle de l’AFCET, 1968.

[Aïvazian, S., Enukov, I. et Méchalkine, L., 1983, 1986], Eléments de modélisation et traitement primaire des données, Moscou, 1983 ; traduction française, éditions MIR, 1986, 389p.

[Alj, A. et Faure, R., 1986], Guide de la Recherche Opérationnelle, Tome premier, Les fondements, Paris, Masson, 1965, 265p.

[Allen, P. M., 1997], Cities and Regions as Self-Organizing Systems, Amsterdam, Gordon and Breach Science Publishers, 1997, 275p.

[Althusser, L., 1968a], « Lénine et la philosophie », Bulletin de la Société Française de Philosophie, séance du samedi 24 février 1968, t. LXIII, 1968.

[Althusser, L., 1968b], Lire le Capital, Paris, Petite collection Maspero, vol. 2, 228p.

[Althusser, L., 1974], Philosophie et philosophie spontanée des savants (1967), Paris, Maspero, 1974, série de cours donnés à l’ENS en 1967, 157p.

[Althusser, L., 1994, 1999], Ecrits philosophiques et politiques, Tome I, Paris, Stock IMEC, 1994 ; réédition : Livre de Poche, Biblio-essais, 1999, 605p.

[Althusser, L., 1995, 2001], Ecrits philosophiques et politiques, Tome II, Paris, Stock IMEC, 1995 ; réédition : Livre de Poche, Biblio-essais, 2001, 632p.

[Amblard, F., 2003], Comprendre le fonctionnement de simulations sociales individus-centrées – Application à des modèles de dynamiques d’opinion, Thèse d’informatique, Université Blaise Pascal – Clermont II, 2003, 112p.

[Amzallag, G. N., 2003], « La complexité végétale », Pour la science, n°314, décembre 2003, pp. 128-133.

[Andler, D., 1992], Introduction aux sciences cognitives, collectif sous la dir. de Daniel Andler, Paris, Gallimard, Folio-Essais, 514p.

[Andler, D., Fagot-Largeault, A. et Saint-Sernin, B., 2002], Philosophie des sciences, Tome I et II, Paris, Folio, coll. Essais, 2002, 1334p.

[Andrieu, B., 1997], « Modélisation architecturale du fonctionnement des cultures : Orientations de l’équipe de Bioclimatologie de Grignon », [INRA-Grignon, 1997], pp. 15-18.

[Aono, M., Kunii, T.L., 1984], “Botanical Tree Image Generation”, IEEE CG&A, may 1984, pp. 10-34.

[Apter, M. J., 1966], Cybernetics and Development, Oxford, Pergamon Press, 1966, 188p.

[Apter, M. J., 1977, 1997], “An Introduction to Reversal Theory”, in It’s a Funny Thing Humour, ed. by Anthony J. Chapman and Hugh C. Foot, Oxford - New York, Pergamon Press, 1977, sans numéros de pages ; accessible à l’adresse suivante : http://www.reversaltheory.org/rtabout.htm.

[Arendt, H., 1958, 1961, 1994], The Human Condition, 1958 ; traduction chez Calmann-Lévy : Condition de l’homme moderne, 1961, version rééditée en coll. Agora-Pockett, 1994, 406p.

[Aristote, DA, 1993], De l’âme, traduction, présentation et notes de Richard Bodéüs, Paris, Garnier-Flammarion, 1993, 293p.

[Arnheim, R., 1969, 1976, 1997], Visual Thought, University of California Press, 1969 ; traduction : La pensée visuelle, Paris, Flammarion, 1976 ; réimpression : Champs-Flammarion, 1997, 350p.

[Aron, R., 1938, 1970], La philosophie critique de l'histoire, Paris, Vrin, 1938 ; réédition : Paris, Seuil, coll. Points, 1970, 318p.

[Aron, R., 1948], Introduction à la philosophie de l'histoire, Paris, NRF-Gallimard, 1948, 353p.

[Aron, R., 1970, 1998], Marxismes imaginaires – D'une sainte famille à l'autre, Paris, Gallimard, 1970 ; réimpression : Folio-essais, 1998, 347p.

[Arsac, J., 1987], Les machines à penser, Paris, Seuil, 1987, 256p.

[Artificial Life, (numéro)], Proc. Of the (numéro)th International Conference on Artificial Life, Cambridge, MIT Press, parution à partir de 1989.

[Ashby, W. R., 1956, 1957, 1999], An Introduction to Cybernetics, London, Chapman & Hall Ltd, 1956 ; seconde impression : 1957, 295p. ; disponible intégralement depuis 1999 sur le site de "Principia Cybernetica Web" : http://pcp.vub.ac.be/books/IntroCyb.pdf.

[Atlan, H., 1972], L'organisation biologique et la théorie de l'information, Paris, Hermann, 1ère édition 1972, nouvelle édition augmentée 1992, 300p.

[Atlan, H., 1999], La fin du « tout génétique » ? Vers de nouveaux paradigmes en biologie, Paris, INRA-éditions, 1999, 91p.

[Attali, J., 1975], La parole et l'outil, Paris, PUF, 1975, 243p.

[Atten, M. et Pestre, D., 2002], Heinrich Hertz – L'administration de la preuve, Paris, PUF, coll. Philosophies, 2002, 127p.

[Auger, P., Baudry, J., Fournier, F., 1992], Hiérarchies et échelles en écologie, publication d'un rapport proposé au SCOPE (Scientific Committee on Problems of the Environment) pour la Conférence de Rio de juin 1992), Paris, Naturalia Publications, 1992, 283 p.

[Austin, J. L., 1962, 1970], How to do Things with Words, Oxford University Press, 1962 ; traduction : Quand dire, c'est faire, Paris, Seuil, 1970, 187p.

[Auzias, J. M., 1967, 1968], Clefs pour le structuralisme, Paris, Seghers, 1967 ; 2ème édition : 1968, 191p.

[Bac, C., 1985-2003], Le langage C, notes d'un cours de Christian Bac, professé à l'Institut National des Télécommunications (INT), accessible sur http://www.framasoft.net/IMG/pdf/langage_c.pdf, 238p.

[Bachelard, G., 1928, 1973], Essai sur la connaissance approchée, Paris, Vrin, 1928 ; réédition : 1973, 310p.

[Bachelard, G., 1938, 1980], La formation de l'esprit scientifique, Paris, Vrin, 1938 ; 11ème édition : 1980, 257p.

[Bachelard, G., 1940, 1983], La philosophie du non, Paris, PUF, 1940 ; 9ème édition : 1983, 147p.

[Bachelard, G., 1949, 1962], Le rationalisme appliqué, Paris, PUF, 1949 ; 2ème édition : 1962, 216p.

[Bachelard, G., 1951, 1965], L'activité rationaliste de la physique contemporaine, Paris, PUF, 1951 ; 1965 : 4ème édition, 225p.

[Bachelard, G., 1953, 1990], Le matérialisme rationnel, Paris, PUF, 1953 ; édition Puf-Quadrige : 1990, 225p.

[Bachelard, S., 1958], La conscience de rationalité, Paris, PUF, 1958, 217p.

[Bachelard, S., 1979], « Quelques aspects historiques des notions de modèle et de justification des modèles, in [Delattre, P. et Thellier, M., 1979], Tome I, pp. 3-19.

[Badiou, A., 1969], Le concept de modèle, Paris, Maspero, collection « Théorie » dirigée par L. Althusser, 1969, 94p.

[Badiou, A., 1976], Théorie de la contradiction, Paris, François Maspero, série « Yenan Synthèses », 1976, 116p.

[Balaceanu, C., 1971], « La pensée cybernétique en biologie », Recherches sur la philosophie des sciences, Bucarest, Editions de l'Académie de la République Socialiste de Roumanie, 1971, p. 245-260.

[Ballot, G. and Weisbuch, G., 2000], Applications of Simulation to Social Sciences, ed. by Gérard Ballot (Paris II) and Gérard Weisbuch (Santa Fe Institute), Paris, Hermes, 462p.

[Barberousse, A. *et al.*, 2000], La philosophie des sciences au XXème siècle, coll., auteurs : A. Barberousse, M. Kistler, P. Ludwig, Paris, Champs Université, Flammarion, 2000, 353p.

[Barberousse, A., 1999], L'expérience, Paris, Garnier-Flammarion, 1999, 255p.

[Barberousse, A., 2000], La physique face à la probabilité, Paris, Vrin, 2000, 210p.

[Barberousse, A., 2002], La mécanique statistique – De Clausius à Gibbs, Paris, Belin, 240p.

[Barberousse, A., Ludwig, P., 2000], « Les modèles comme fictions », Philosophie, n°68, décembre 2000, pp. 16-43.

[Barbut, M., 1967], Mathématiques des sciences humaines I- Combinatoire et Algèbre, Paris, PUF, coll. Sup. – Section « Le psychologue », 1967, 246p.

[Barbut, M., 1968], Mathématiques des sciences humaines II- Nombres et Mesures, Paris, PUF, coll. Sup. – Section « Le psychologue », 1968, 289p

[Barker, S. B., Cumming, G. et Horsfield, K., 1973], "Quantitative Morphometry of the Branching Structures of Trees", Journal of Theoretical Biology, 1973, 40, pp. 33-43.

[Barrow, J. D., 1992, 1996, 2003], Perché il mondo è matematico ?, Rome, éditions Laterza, 1992 ; traduction : Paris, Odile Jacob : Pourquoi le monde est-il mathématique ?, 1996, réimpression en coll. « poches » : 2003, 117p.

[Barthélémy, D., 1988], Architecture et sexualité chez quelques plantes tropicales : le concept de floraison automatique. Thèse Doct., physiologie, biologie des organismes et des populations, Montpellier, France, 262p.

[Barthélémy, D., 1991], "Levels of organization and repetition phenomena", Acta Biotheoretica, vol. 39, pp. 309-323.

[Barthélémy, D., Blaise, F., Fourcaud, T., Nicolini, E., 1995], « Modélisation et simulation de l'architecture des arbres : bilan et perspectives », Revue Forestière Française, n°spécial de 1995, vol. 47, pp. 71-96.

[Barthélémy, D., Edelin, C., Hallé, F., 1989], "Architectural concepts for tropical trees", Tropical Forests : Botanical Dynamics, Speciation and Diversity, ed. by L.B. Holm-Nielsen, I. Nielsen and H. Balslev, London, Academic Press, 1989, pp. 89-100.

[Barthes, R., 1985], L'aventure sémiologique, Paris, Seuil, coll. Points, 1985, 363p.

[Bartlett, M. S., 1960], "Monte Carlo Studies in Ecology and Epidemiology", Proc. of the 4th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, vol. 4, University of California, 1960, pp. 39-55.

[Bartlett, M. S., 1965], "Multivariate Statistics", in [Waterman, T. H. and Morowitz, H. J., 1965], pp. 201-224.

[Bartoli, N. et Del Moral, P., 2001], Simulation et algorithmes stochastiques, Toulouse, Cepadues-Editions, 218p.

[Baudrillard, J., 1981, 2002], Simulacres et simulation, Paris, Galilée, 1981 ; réimpression : 2002, 235p.

[Bauer, P. S., 1930], "The validity of minimal principles in physiology", The Journal of General Physiology, July 1930, vol. 13, pp. 617-619.

[Beaumont, J. H., 1939], "An analysis of growth and yield relationships of coffeetrees in the Kona district, Hawaii", Journal of Agricultural Research (Washington), vol. 59, n° 3, Aug. 1, 1939, pp. 223-235.

[Beaune, J. C., 1998], Philosophie des milieux techniques, Paris, Champ-Vallon, 1998, 618p.

[Bedau, M. A. 1998], "Philosophical content and method of Artificial Life", in The Digital Phoenix: How computers are changing philosophy, ed. by T. W. Binum and J.H Moor, Basil Blackwell, Oxford, pp. 135-152.

[Beemster, G. T. et Baskin, T. I., 1998], "Analysis of cell division and elongation underlying the developmental acceleration of root growth in Arabidopsis thaliana", Plant Physiology, April 1998, 116 (4), pp. 1515-1526.

[Beetschen, J. C., 1984], La génétique du développement, Paris, PUF, QSJ, 1984, 128p.

[Bejan, A., 2000], Shape and Structure, from Engineering to Nature, Cambridge University Press, 2000, 324p.

[Bell, A. D., 1976], "Computerized Vegetative Mobility in Rhizomatous Plants", in [Lindenmayer, A. et Rozenberg, G., 1976], pp. 3-14.

[Beltran, A. et Griset, P., 1990], Histoire des techniques aux XIXème et XXème siècles, Paris, Armand Colin, 1990.

[Benacerraf, P., Putnam, H., 1964, 1983], Philosophy of Mathematics, Prentice Hall, 1964; Cambridge University Press (2nd edition), 1983, 600p.

[Bender, E. A., 1978, 2000], An Introduction to Mathematical Modeling, New York, Wiley, 1978 ; réimpression : New York, Dover Publications Inc., 2000, 256p.

[Benkirane, R., 2002], La complexité, vertiges et promesses – 18 histoires de sciences, Paris, Le Pommier, 420p.

[Benoist, J. et Merlini, F., 2001], Historicité et spatialité, Paris, Vrin, 2001, 255p.

[Bensene, R., 2002], "Monroe 920 Desktop Calculator", 4 pages de documents accessibles à l'adresse suivante : http://www.oldcalculatormuseum.com/monroe920.html.

[Benzécri, J. P., 1973], L'analyse des données I- La taxinomie, leçons sur l'analyse factorielle et la reconnaissance des formes et travaux du laboratoire de l'Université Paris VI, rédigés et publiés sous la dir. du Professeur J. P. Benzécri, Paris, Dunod, 1973.

[Benzécri, J. P., 1982], Histoire et préhistoire de l'analyse des données, Paris, Bordas, 1982, 159p.

[Berge, C., 1958], La théorie des graphes et ses applications, Paris, Dunod, 1958.

[Bergé, P., Pomeau, Y, Dubois-Gance, M., 1994], Des rythmes au chaos, Paris, Odile Jacob, 294p.

[Bergé, P., Pomeau, Y, Vidal, Ch., 1984, 1988], L'ordre dans le chaos, Paris, Hermann, préf. de David Ruelle, 1984 ; 2ème édition corrigée : 1988, 353p.

[Berger, P, 1999], L'informatique libère l'humain, Paris, L'Harmattan, 1999, 216p.

[Bergson, H., 1896, 1939, 1993], Matière et mémoire, Paris, 1896 ; PUF, 1939 ; 4ème édition : PUF-Quadrige, 1993, 281p.

[Bergson, H., 1941], L'évolution créatrice, Paris, PUF, 1941, 372p.

[Berkeley Symposium, (année), (numéro)], Proceedings of the (numéro)th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, ed. by Lucien Lecam and Jerzy Neyman, University of California, Berkeley.

[Bernad, J, Paker, M., 1980], Macroscopie de l'entreprise, Paris, Les éditions d'organisation, préface de Joël de Rosnay, 1980, 215p.

[Bertalanffy (von), L., 1968, 1973], General System Theory, New York, Georg Braziller ; traduction : Théorie générale des systèmes, Paris, Bordas, 1973, 298p.

[Berthelot, J. M., 2001], Epistémologie des sciences sociales, Paris, PUF, Coll. Premier Cycle, 2001, 593p.

[Bertin, J., Ritout, M. et Rougier, J. C., 1967], l'exploitation partagée des calculateurs, Paris, Dunod, 1967, 198p.

[Besançon, A., 1970], Histoire et expérience du moi, Paris, Flammarion, 245p.

[Besançon, A., 1994], L'image interdite – Une histoire intellectuelle de l'iconoclasme, Paris, Fayard, 1994, 526p.

[Bettayeb, K., 2002], « La cellule virtuelle est née », Science et Vie, n°1015, avril 2002, pp. 64-67.

[Biard, A., Bourel, D. et Brian, E., 1997], Henri Berr et la culture du 20ème siècle, n° spécial de la Revue de synthèse, dir. par A. Biard, D. Bourel et E. Brian, Paris, Albin Michel, 1997, 366p.

[Bichat, H. et Varenne, F., 2001], Entretien transcrit, 19p.

[Biddiss, M. D., 1977, 1980], The Ages of the Masses – Ideas and Society in Europe since 1870, London, Penguin Books, 1977 ; traduction : L'ère des masses – Histoire de la pensée européenne (Tome 6), Paris, Seuil, coll. Points, 1980, 381p.

[Bignone, F. A., 1992], "Cells-Gene Interactions Simulation on a Coupled Map Lattice", article publié sans lieu, acccessible à l'adresse http://gendyn.ist.unige.it/diffelpr/diffelpr.html.

[Binder, E., 1967], La génétique des populations, Paris, PUF, QSJ, 1967, 128p.

[Bishop, M. A. and Trout, J. D., 2002], "50 Years of Successful Predictive Modeling Should Be Enough : Lessons for Philosophy of Science", Philosophy of Science, 69 (September 2002), pp. S197-S208.

[Bitsakis, E., 1973, 1983], Physique et matérialisme, 1ère édition en 1973 sous le titre Physique contemporaine et matérialisme dialectique, 2ème édition : Paris, Editions sociales, 1983.

[Black, M., 1962, 1976], Models and Metaphors – Studies in Language and Philosophy, Ithaca and London, Cornell University Press, 1962, sixth printing : 1976, 267p.

[Blackith, R. E., 1965], "Morphometrics", in [Waterman, T. H. and Morowitz, H. J., 1965], pp. 225-249.

[Blaise, F., 1991], Simulation du parallélisme dans la croissance des plantes et application. Nouvelle thèse n°1071 (spécialité informatique), Université Louis Pasteur, Strasbourg, France, 186p.

[Blaise, F., 1992], « Simulation de couverts végétaux réalistes en 3D », XVIIème Congrès I.S.P.R.S., USA, Washington, DC / L.W. Fritz, J.R. Lucas Eds, Archives internationales de Photogrammétrie et de télédétection, 1992, 24, B3, (3), pp. 207-212.

[Blaise, F., Barczi, J. F., Jaeger, M., Dinouard P. et Reffye (de), Ph., 1998], "Simulation of the growth of plants – Modeling of metamorphosis and spatial interactions in the architecture and development of plants", Cyberworlds, ed. By Kunii TL. and Luciani L., Springer Verlag, Tokyo, 1998, pp. 81-109.

[Blaise, F., Reffye (de), Ph., 1994], « Simulation de la croissance des arbres et influence du milieu : le logiciel AMAPpara », in Proceedings of the 2nd African Conference on Research, Computer Science (CARI'94), Ouagadougou, Burkina Faso, 12-18 October 1994 / J. Tankoano, Ed. INRIA, ORSTOM, 1994, pp. 61-75.

[Blanché, R., 1972], L'épistémologie, Paris, PUF, QSJ, 1972, 127p.

[Bloomenthal, J., 1985], "Modeling the Mighty Maple", Computer Graphics, vol. 19 (3), July 1985, pp. 305-311.

[Blumenberg, H., 1966, 1988, 1999], Die Legitimität der Neuzeit, Frankfurt am Main, Suhrkamp Verlag, 1966 ; 2ème édition : 1988 ; traduction à partir de la 2ème édition : La légitimité des temps modernes, Paris, Gallimard, 1999, 688p.

[Boden, M. A., 1996], The philosophy of Artificial Life, ed. by Margaret A. Boden, Oxford University Pres, Oxford Readings in Philosophy, 1996, 405p.

[Boltzmann, L., 1895, 1902, 1987], Leçons sur la théorie des gaz, 1ère édition 1895 ; traduction de A. Gallotti, Paris, Gauthier-Villars, 1902 ; réimpression : Sceaux, Jacques Gabay, 1987, 280p.

[Boltzmann, L., 1897], « Über die Unentbehrlichkeit der Atomistik in der Naturwissenschaft», Annalen der Physik und Chemie, 1897, nouvelle série, vol. 60, p. 23, traduction de J. Ruthel,; republié dans Les atomes : une anthologie historique, édité par B. Bensaude-Vincent, Paris, Presses Pocket – Agora, 1991, pp. 241-259.

[Boltzmann, L., 1902], article « Model » de l'Encyclopaedia Britannica, 11ème édition, Londres, 1902, pp. 213-220.

[Bonabeau, E. et Theraulaz, G., 1994], Intelligence collective, sous la direction d'Eric Bonabeau et Guy Theraulaz, Paris, Hermès, 1994, 288p.

[Bonneuil, C., 1991], Des savants pour l'empire – Structuration des recherches scientifiques coloniales au temps de la « mise en valeur des colonies françaises » 1917-1945, Mémoire de DEA sous la dir. de D. Pestre, Paris, Editions de l'ORSTOM, 125p.

[Bonneuil, N., 1997], Introduction à la modélisation démographique, Paris, Armand Colin, 1997, 128p.

[Booch, G., Rumbaugh, J. et Jacobson, I., 1998, 2001], The Unified Modeling Language User Guide, The Addison-Wesley Object Technology Series, Addison-Wesley, 1998; traduction : Le guide de l'utilisateur UML, deuxième tirage en 2001, Paris, Eyrolles, 534p.

[Boorstin, D. J., 1971], L'image, traduction de l'anglais - version originale américaine non citée ni datée -, Paris, UGE 10/18, 1971, 436p.

[Borchert, R. et Honda, H., 1984], "Control of Development in the Bifurcating Branch System of *Tabebuia Rosea* : A Computer Simulation", Botanical Gazette, 1984, 145 (2), pp. 184-195.

[Borel, E., 1950], Probabilité et statistique, Paris, PUF, QSJ, 1950, 128p.

[Borghi, R., Clavin, P., Linan, A., Pelce, P. et Sivanshinsky, G.I., 1985], Modélisation des phénomènes de combustion, Ecole d'été CEA-EDF-INRIA sur les problèmes non linéaires appliqués, Paris, Eyrolles, 204p.

[Bouché, M., 1990], Ecologie opérationnelle assistée par ordinateur, préface de F. di Castri. Paris, Masson, 1990, 344p.

[Boucher, H., 1960], Organisation et fonctionnement des machines arithmétiques, Paris, Masson, 1960, 427p.

[Bouchon, J. et Poupardin, D., 1995], Entretien avec Jean Bouchon mené le 21 juillet 1995 à Nancy par Denis Poupardin pour le compte des Archorales-INRA (Archives orales de l'INRA), 21 pages, accessible sur le site http://www.inra.fr/archorales/

[Bouchon, J., 1995], sous la dir. de, Architecture des arbres fruitiers et forestiers, Actes du colloque des 23-25 novembre 1993 (Montpellier), Paris, INRA-éditions, collection « Les colloques », n°74, 1995, 349pp.

[Bouchon, J., Reffye (de), Ph., Barthélémy, D., 1997], Modélisation et simulation de l'architecture des végétaux, Paris, INRA-éditions, collection « Science Update », (suite des actes du colloque sus-cité), 1997, 435pp.

[Boudon, R. et Clavelin, M., 1994], Le relativisme est-il résistible ?, Paris, PUF, coll. Sociologies, 1994, 324p.

[Bougnoux, D., 1993], Sciences de l'information et de la communication, Paris, Larousse, coll. Textes essentiels, 1993, 809p.

[Boulaine, J., 1971], L'agrologie, Paris, PUF, QSJ, 1971, 128p.

[Boulaine, J., 1996], Histoire de l'agronomie en France, deuxième édition revue et augmentée, Paris, Lavoisier, coll. Tec & Doc, 1996, 437p.

[Bouleau, N., 1999], Philosophies des mathématiques et de la modélisation, Paris, l'Harmattan, 1999, 363p.

[Bourg, D., 1996], L'homme artifice, Paris, Gallimard, 1996.

[Boutot, A., 1991], « La philosophie du chaos », Revue Philosophique, Paris, PUF, n°2, 1991, pp. 145-178.

[Boutot, A., 1993], L'invention des formes, Paris, Odile Jacob, 1993, 377p.

[Bouveresse, J., 1974, 1987], Le mythe de l'intériorité – Expérience, signification et langage privé chez Wittgenstein, Paris, Editions de minuit, 1987, 734p.

[Bouveresse, J., 1991], « Hertz, Boltzmann et le problème de la vérité des théories », in La vérité est-elle scientifique ?, Séminaire Interdisciplinaire du Collège de France, Paris, Editions Universitaires, 1991, p. 117-141.

[Bouveresse, J., 1993, 2004], Robert Musil – L'homme probable, le hasard, la moyenne et l'escargot de l'histoire, Paris, Editions de l'Eclat, 1993 ; réédition : 2004, 317p.

[Bouveresse, J., 1995], Langage, perception et réalité – Tome 1 : la perception et le jugement, Nîmes, Editions Jacqueline Chambon, 1995, 487p.

[Bouveresse, J., 1998], Le philosophe et le réel, entretiens avec Jean-Jacques Rosat, Paris, Hachette-Littératures, 1998, 263p.

[Bouveresse, J., 2001], « Ludwig Boltzmann et la philosophie », in La philosophie autrichienne de Bolzano à Musil, Paris, Vrin, 2001, pp. 139-169.

[Brenner, A., 2003], Les origines françaises de la philosophie des sciences, Paris, PUF, 2003, 224p.

[Brès, Y., 2002], L'avenir du judéo-christianisme, Paris, PUF, 2002, 127p.

[Bresenham, J. E., 1965], "Algorithm for computer control of a digital plotter", IBM Systems Journal, 1965, vol. 4, n°1, pp. 25-30.

[Breton, P. *et al.*, 1990], La techno-science en question – Eléments pour une archéologie du XXe siècle, collectif de Philippe Breton, Alain-Marc Rieu et Franck Tinland, Paris, Champ-Vallon, coll. Milieux, 1990, 252p.

[Breton, P. et Proulx, S., 1989], L'explosion de la communication – La naissance d'une nouvelle idéologie, Paris, La Découverte, 1989, 286p.

[Breton, P., 1987, 1990], Une histoire de l'informatique, Paris, La Découverte, 1987 ; réédition : Seuil, 1990, 269p.

[Breton, P., 1993], « Pour une approche multidimensionnelle de l'informatique », Revue du Musée des Arts et Métiers, n°2, février 1993, pp. 4-9.

[Brillouin, L., 1959, 1988], La science et la théorie de l'information, Paris, Masson, 1959 ; réimpression : Paris, Editions Jacques Gabay, 1988, 302p.

[Bristol, 1959], Models and Analogues in Biology, Proc. of the Symposium of the Society for Experimental Biology held at Bristol, n°XIV, Cambridge University Press, 1960, 255p.

[Broglie (de), L., 1967], « Les représentations concrètes en microphysique », in Logique et connaissance scientifique, collectif sous la dir. de Jean Piaget, Paris, Pléiade, 1967, pp. 706-725.

[Brouaye, F., 1990], La modélisation des incertitudes (Probabilités – Signaux et communications – Statistiques), Paris, Eyrolles, Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France (« les Cours de l'Ecole Supérieure d'Electricité », n°8), 1990, 234p.

[Bru, B., Colasse, B. et Pavé, F., 2002], « L'Institut Henri Poincaré, aux sources de la Recherche Opérationnelle – Entretien avec Bernard Bru mené par Bernard Colasse et Francis Pavé », Gérer et Comprendre, mars 2002, n°67, pp. 76-91.

[Bruaire, C., 1980, 1995], « Hegel », article de l'édition de 1980 de l'Encyclopedia Universalis, réédité sous CD-ROM, 1995.

[Bruaire, C., 1985, 1993], La dialectique, Paris, PUF, QSJ, 1985 ; 2ème édition : 1993, 127p.

[Bruckner, P., 1983, 1986], Le sanglot de l'homme blanc, Paris, Seuil, 1983 ; réimpression : Seuil, coll. Points Actuels, 1986, 316p.

[Brügger, N., Frandsenn, F. et Pirotte, D., 1993], Lyotard, les déplacements philosophiques, collectif dir. par Niels Brügger *et al.*, Bruxelles, De Boeck Université, 1993, 159p.

[Bruneau de Miré, Ph. et Lotodé, R., 1974], « Comportement de familles hybrides de cacaoyers soumis aux attaques d'homoptères », Café, Cacao, Thé, Vol. 18, n°3, juil.-sept. 1974, pp. 216-220.

[Bruter, C. P., 1982], Les architectures du feu – Considérations sur les modèles, Paris, Flammarion, Nouvelle bibliothèque scientifique, 1982, 235p.

[Bruter, C. P., 1993], Modèles et transformations – La biologie théorique de Pierre Delattre, Actes des journées Pierre Delattre, Collège de France, 4 et 5 décembre 1987, coordonnés par C. P. Bruter, Paris, Polytechnica, 1993, 148p.

[Buck-Sorlin, G. H. et Bachmann, K., 2000], "Simulating the morphology of barley spike phenotypes using genotype information", Agronomie, 2000, vol. 20, pp. 691-702.

[Bud, R., 1998], Instruments of Science – An Historical Encyclopedia, ed. by R. Bud, Science Museum London, Garland Publishing, Inc., 1998.

[Bueno, O., French, S. and Ladyman, J., 2002], "On representing the Relationship between the Mathematical and the Empiricial", Philosophy of Science, 69 (September 2002), pp. 497-518.

[Bulletin of Mathematical Biophysics, (volume), (année)], a paru de 1939 à 1972.

[Bunge, M., 1968], « Les concepts de modèle », L'âge de la science, n°3, juillet-septembre 1968, p. 165-180.

[Burian, R. M. et Gayon, J., 1990], « La génétique après la seconde guerre mondiale. Les laboratoires de Gif », Cahiers pour l'histoire du CNRS, 1990, 7 ; disponible en anglais à l'adresse http://picardp1.ivry.cnrs.fr/~jfpicard/index.html.

[Burks, A. W., 1970], Essays on Cellular Automata, ed. by Arthur W. Burks, Urbana, University of Illinois Press, 1970, 375p.

[Buser, P. et Lestienne, R., 2001], Cerveau Information Connaissance, Paris, CNRS Editions, 2001,227p.

[Cadoz, C., 1994], Les réalités virtuelles, Paris, Flammarion, collection Dominos, 1994, 125p.

[Café, Cacao, Thé, CD I], [Café, Cacao, Thé, CD II] ou « Titre de l'article » in [Café, Cacao, Thé, (volume), (numéro), (mois-mois+2 année)], Revue trimestrielle de l'IFCC de 1957 à 1994, Texte intégral sur 2 CD-ROM édités par le CIRAD et l'AUPELF-UREF, Consortium – Presse électronique. Cette revue est devenue Plantation, recherche, développement depuis 1995, sous administration du CIRAD.

[Caillé, A., 1989, 2003], Critique de la raison utilitaire – Manifeste du M.A.U.S.S., Paris, La Découverte, 1989 ; réimpression : 2003, 168p.

[Canguilhem, G., 1955], La formation du concept de réflexe aux XVIIème et XVIIIème siècles, Paris, PUF, 1955, 208p.

[Canguilhem, G., 1963, 1968, 1994], « Modèles et analogies dans la découverte en biologie », conférence prononcée au *Symposium on the History of Science*, University of Oxford, 9-15 july 1961, publiée en anglais en 1963, traduite et publiée dans les Etudes d'histoire et de philosophie des sciences concernant les vivants et la vie, Paris, Vrin, 1968, réimpression : 1994.

[Canguilhem, G., 1972], La mathématisation des doctrines informes, actes du colloque tenu à l'Institut d'Histoire des Sciences de l'Université de Paris, sous la dir. de G. Canguilhem, Paris, Hermann, 1972, 237p.

[Canguilhem, G., 1977, 2000], Idéologie et rationalité, Paris, Vrin, 1977 ; réédition : Paris, Vrin, 2000, 145p.

[Capot, J., 1972], « L'amélioration du caféier en Côte d'Ivoire – Les hybrides 'Arabusta' », Café, Cacao, Thé, vol. 16, n°1, janvier-mars 1972, pp. 3-16.

[Capot, J., Dupautex, B. et Durandeau, A., 1968], « L'amélioration du caféier en Côte-d'Ivoire – Duplication chromosomique et hybridation », Café, Cacao, Thé, vol. 12, n°2, avril-juin 1968, pp. 114-125.

[Carnap, R., 1928, 2002], Der logische Aufbau der Welt, Berlin, Weltkreis-Verlag, 1928 ; traduction : La construction logique du monde, Paris, Vrin, 2002, 370p.

[Carnap, R., 1932, 1934, 1995], « Die physikalische Sprache als Universalsprache der Wissenschaft », Erkenntnis, Bd. 2, H 5/6, pp. 432-465 ; traduction : The unity of science, Chippenham, Wiltshire, Antony Roewe, 1934 ; réimpression : Thoemmes Press, Bristol, 1995, 101p.

[Carnap, R., 1934, 1937, 2002], Logische Syntax des Sprache, Julius Springer, Wien, 1934 ; The logical syntax of language, traduit de l'allemand par A. S. von Zeppelin, London, Paul Kegan, 1937 ; réimpression : London, Open Court, 2002, 352p.

[Carnap, R., 1934], "On the Character of Philosophical Problems", Philosophy of Science, 1934, vol. 1, n°1, pp. 5-19.

[Carrier, M. *et al.*, 2000], actes du colloque commun aux Universités de Konstanz (Allemagne) et de Pittsburgh (Etats-Unis), 3-7 octobre 1997 ; titre de l'ouvrage résultant : Science at Century's End – Philosophical questions on the Progress and Limits of Science, ed. by Carrier, M., Massey, G. J. et Ruetsche, L., University of Pittsburgh Press / Universitätsverlag Konstanz, 2000, 385p.

[Carrilho, M. M., 1997], Rationalités – Les avatars de la raison dans la philosophie contemporaine, Paris, Hatier, 1997, 80p.

[Cartwright, N., 1983], How the Laws of Physics lie, Oxford, Oxford University Press, 1983, 221p.

[Caseau, P., 1986], « Les modèles numériques et leur place dans la recherche-développement », Culture Technique, n°18, mars 1988, p. 126-130.

[Caseau, P., 1996, 2002], « Crise ou mutation de la simulation numérique », version française d'un article publié en anglais en 1996, communication personnelle dans sa version française remaniée (en 2002), 11 pages.

[Cassirer, E., 1910, 1977], Substanzbegriff und Funktionsbegriff – Untersuchungen über die Grundfragen der Erkenntniskritik, Berlin, 1910 ; traduction : Substance et Fonction – éléments pour une théorie du concept, Paris, Editions de Minuit, 1977, 429p.

[Cassirer, E., 1924, 1973], Sprache und Mythos, sans lieu, 1924 ; traduction : Langage et mythe, Paris, Editions de Minuit, 1973, 125p.

[Cassirer, E., 1929, 1972, 1999], Philosophie der symbolischen Formen III, sans lieu, 1929 ; traduction : Philosophie des formes symboliques – III. La phénoménologie de la connaissance, Paris, Editions de Minuit, 1972 ; réimpression : 1999, 610p. ; plus particulièrement : « 'Symbole' et 'schéma' dans le système de la physique moderne », pp. 494-527.

[Cassirer, E., 1945, 1970, 1991], "Rousseau-Kant-Goethe. Two Essays", Journal of the History of Ideas, 1945, sans date précise ni numéros de page ; réimpression : Princeton, Princeton University Press, 1970 ; traduction : Rousseau, Kant, Goethe. Deux essais, Paris, Belin, 1991, 143p.

[Caullery, M., 1941, 1957], Les étapes de la biologie, Paris, PUF, QSJ, 1941, réédition : 1957, 128p.

[Cavaillès, J., 1935], « L'école de Vienne au Congrès de Prague », Revue de métaphysique et de morale, vol. 42, n°1, 1935, pp. 137-149.

[Cavaillès, J., 1947, 1960], Sur la logique et la théorie de la science, Paris, PUF, 1ère édition : 1947, 2ème édition : 1960, 79p.

[Cavaillès, J., 1962], Philosophie mathématique, Paris, Hermann, coll. « Histoire de la pensée », 1962, 274p.

[CCI, 1989], Les chemins du virtuel – Simulation informatique et création industrielle, Paris, collection « les cahiers du Centre de Création Industrielle » du Centre Georges Pompidou, 1989, 191p.

[CEA, Clefs, 2002-2003], Recherche et simulation, n° spécial de la revue CLEFS du CEA (Commissariat à l'Energie Atomique), Hiver 2002-2003, n°47, 108p.

[CEMAGREF, 1998], Modèles et systèmes multi-agents pour la gestion de l'environnement et des territoires, Actes du colloque SMAGET, 5-8 octobre 1998, coordinateur : Niels Ferrand, Clermont-Ferrand, CEMAGREF Editions, 1999, 466p.

[Chalmers, A. F., 1976, 1987, 1990], What is this Thing Called Science ? An Assessment of the Nature and Status of Science and its Methods, University of Queensland Press, St Lucia, 1976 : traduction : Qu'est-ce que la science ?, Paris, La Découverte, 1987 ; réedition : LdP, biblio-essais, 1990, 287p.

[Changeux, J. P. et Connes, A., 1989, 1992], Matière à pensée, Paris, Odile Jacob, 1989 ; réimpression : Points-Odile Jacob, 1992, 267p.

[Charon, J. E., 1965], De la physique à l'homme, Paris, Gonthier, coll. Médiations, 1965, 189p.

[Charraud, N., 1997], Lacan et les mathématiques, Paris, Economica, coll. Anthropos, 1997, 110p.

[Châtelet, G., 1993], Les enjeux du mobile, Paris, Seuil, 1993, 282p.

[Chatelin, Y., 1996], « Genèse, mutation et éclatement des paradigmes, le cas de la science des sols tropicaux », Les sciences hors d'Occident au vingtième siècle, vol. 3 : « Nature et environnement », ORSTOM-éditions, 1996, dir. Yvon Chatelin, pp.141-153.

[Chaunu, P., 1975, 1984, 1994], Le temps des réformes, Paris, Fayard, 1975 ; réédition : Bruxelles, Editions Complexes ; réimpression : 1994, 2 tomes : 570p.

[Chauvet, G., 1995], La vie dans la matière – Le rôle de l'espace en biologie, Paris, Champs-Flammarion, 1995, 292p.

[Chazal, G., 1994], « La simulation informatique comme mesure du possible », in La mesure : instruments et philosophes, Actes du Colloque des 28-29 octobre 1993, au Centre d'Analyse des Formes et des Systèmes de la Faculté de Philosophie de Lyon III, Paris, Champ-Vallon, 1994, pp. 147-155.

[Chazal, G., 1995], Le miroir automate – introduction à une philosophie de l'informatique, Paris, Champ-Vallon, 1995, 254p.

[Chazal, G., 1996], « La pensée et les machines – Le mécanisme algorithmique de John von Neumann », in [Neumann (von), J., 1948, 1951, 1996], pp. 7-58.

[Chazal, G., 1997], Formes, Figures, Réalité, Paris, Champ-Vallon, 1997, 251p.

[Chazal, G., 2000], Les réseaux du sens, Paris, Champ Vallon, 2000, 281p.

[Chen, J., 2001], A Bioinformatics Discovery-oriented Computing Framework, PhD Thesis, Chapter 1-2, 2001 : http://www-users.cs.umn.edu/~ychen/Research/thesis_Jake_Chen_c1_c2.pdf, 27p.

[Chenet, F. X., 1994], L'assise de l'ontologie critique – L'esthétique transcendantale, Presses Universitaires de Lille, 1994, 440p.

[Cherruault, Y., 1983], Biomathématiques, Paris, PUF, « Que sais-je ? », 1983, 128p.

[Cherruault, Y., 1998], Modèles et méthodes mathématiques pour les sciences du vivant, Paris, PUF, 1998, 299p.

[Cheruy, A., Gautier, C. et Pavé, A., 1980], « Analyse de systèmes biologiques : certains aspects méthodologiques liés à la modélisation », in [Lesourne, J., 1980], Tome I, pp. 73-152.

[Chiaraviglio, L., 1965], "Sequential Machines and the Coding of Polypeptides", Journal of Theoretical Biology, vol. 8, 1965, pp. 130-140.

[Chomsky, N., 1957], Syntactic Structures, La Haye, Mouton & Co ; traduction française : Structures syntaxiques, de M. Braudeau, Paris, Seuil, 1969.

[Chomsky, N., 1959, 1967, 2000], “A review of B. F. Skinner’s Verbal Behavior”, Language, 1959, vol. 35, n°1, pp. 26-58 ; réimprimé avec une nouvelle préface dans Readings in the Psychology of Language, ed. Leon A. Jakobovits and Murray S. Miron, Prentice-Hall, Inc., 1967, pp.142-143 ; accessible en 2000 à l’adresse internet suivante http://cogprints.ecs.soton.ac.uk/archive/00001148/00/chomsky.htm.

[Chomsky, N., 1965, 1971, 1975], Aspects of the Theory of Syntax, Cambridge, USA, MIT Press, 1965 ; traduction : Aspects de la théorie syntaxique, Paris, Seuil, coll. Travaux linguistiques, 1971 ; réimpression : 1975, 284p.

[Chomsky, N., 1968, 1976], Language and Mind, New York, Harcourt, Brace & World Inc., 1968 ; traduction : Le langage et la pensée, Paris, Petite bibliothèque Payot, 1976, 147p.

[Chomsky, N., 1977, 1980], Essays on Form and Interpretation, New York, Elsevier North-Holland Inc., 1977 ; traduction : Essais sur la forme et le sens, Paris, Seuil, coll. Travaux Linguistiques, 1980, 283p.

[Chorafas, D. N., 1966], La simulation mathématique et ses applications, Paris, Dunod, 1966.

[Chorafas, D. N., 1960], Traité des ordinateurs, Paris, Hermann, 1960, 398p.

[Chorafas, D. N., 1965], Systems and Simulation, New York, Academic Press, 1965.

[Christin, O., 1991], Une révolution symbolique - l’iconoclasme huguenot et la reconstruction catholique, Paris, Editions de Minuit, 1991, 351p.

[Churchland, P. S. et Sejnowski, T. J., 1992], The Computational Brain, Cambridge, Massachusetts, MIT Press, 1992, 544p.

[CIRAD, 1997], rapport d’activité du CIRAD : « Le Cirad en 1997 », Service des éditions du CIRAD, Délégation à l’information scientifique et technique, Svi-Publicep, Montpellier, Centre de Recherche de Montpellier – BP 5035 – 34032 Montpellier Cedex 1.

[CIRAD, 1999], « Images de la recherche », Service des éditions du CIRAD, Délégation à l’information scientifique et technique, Svi-Publicep, Montpellier, Centre de Recherche de Montpellier – BP 5035 – 34032 Montpellier Cedex 1.

[CIRAD, 1999], rapport d’activité du CIRAD : « Le Cirad en 1998 », Service des éditions du CIRAD, Délégation à l’information scientifique et technique, Svi-Publicep, Montpellier, Centre de Recherche de Montpellier – BP 5035 – 34032 Montpellier Cedex 1 ; également accessible sur internet au début de l’année 2000 par l’adresse http://www.cirad.fr/presentation/cirad99/c2/resu/am_5.htm.

[CIRAD, CD, 1997], CD-ROM inclus dans le rapport de 1997.

[CIRAD-INRA, 2001], Modélisation des agroécosystèmes et aide à la décision, collectif édité par Eric Malézieux, Guy Trébuil et Marc Jaeger, édition conjointe : Montpellier et Versailles, Librairie du CIRAD et INRA éditions, 2001, 447p.

[Clark, A., 1997, 2001], Being There – Putting Brain, Body and World Together Again, Cambridge, MIT Press, 1997 ; 5ème édition : 2001, 269p.

[Closkey, J.F.Mc et Trefethen, F.N., 1954, 1957], Operations Research for Management, Baltimore, The Johns Hopkins Press, 1954 ; traduction : Introduction à la recherche opérationnelle, Paris, Dunod, 1957, 206p.

[CNRS Info, 2000], CNRS Info, n° spécial de la revue sur les mathématiques, mai 2000.

[CNRS, 1982], Modélisation mathématique et simulation des systèmes de l’environnement, Textes du 1er séminaire du Programme Interdisciplinaire de Recherche sur l’Environnement du CNRS, coordonnateur : J. Aguilar-Marin, Toulouse, Editions du CNRS, Centre régionale de Toulouse, 1982, 207p.

[CNRS, 1990], La modélisation, confluent des sciences, Actes du colloque interdisciplinaire des 15 et 16 juin 1989 de Villeurbanne, coordonnateurs : M. Brissaud, M. Forsé, A. Sighed, Paris, Editions du CNRS, Centre Régionale de Lyon, 1990, 242p.

[CNRS, 1996], Tendances nouvelles en modélisation pour l’environnement, Actes du colloque CNRS des 16-17 janvier 1996 (choix d’interventions) – Programme Environnement du CNRS, version publiée aux éditions Elzevier, Paris, 1997, 445p.

[Cohen, D., 1967], “Computer Simulation of Biological Pattern Generation Processes”, Nature, vol. 216, october 21. 1967, pp. 246-248.

[Cohen, D., 2002], “Scientific Bibliography“, 2000, accessible sur le site http://www.evolutionary-ecology.com/cohenhd.html.

[Cohen-Tannoudji, G., 1996, 1997], Virtualité et réalité dans les sciences, collectif sous la dir. de Gilles Cohen-Tannoudji, Paris, Editions Frontières, 1996 ; réédition : Diderot multimédia, 1997, 219p.

[Cohn, D. L., 1954a], “Optimal systems : I. The vascular system”, Bulletin of mathematical biophysics, vol. 16, 1954, pp. 59-74.

[Cohn, D. L., 1954b], “Optimal systems : II. The vascular system”, Bulletin of mathematical biophysics, vol. 17, 1955, pp. 219-227.

[Cole, K. S., 1965], “Theory, experiment, and the nerve impulse”, in [Waterman, T. H. and Morowitz, H. J., 1965], pp. 136-171.

[Coléno, A. et Varenne, F., 2001], Entretien transcrit, 20p.

[Coli, P. Y., Alexandrian, D., Binggeli, F. et Coste, N., 2004], « La simulation des sautes de feu », Pour la science, n°322, août 2004, pp. 30-37.

[Collot, F. et Varenne, F., 2004], Entretien transcrit, 19p.

[Collot, F., 1991], « L'entropie généralisée (G-entropie), une mesure des nivaux d'organisation », Acta Biotheoretica, 1995, vol. 39, pp. 287-298.

[Collot, F., 1992], « Un essai de généralisation du concept d'entropie : application à l'information, la biologie, la sociologie, la théorie générale des systèmes », Actes du 114ème Congrès National des Sociétés Savantes, Paris 1989, Editions du CTHS, 1992, pp. 73-86.

[Collot, F., 1995], « Correlations entre complexification et instabilité dans une formalisation du concept de complexité », Acta Biotheoretica, 1995, vol. 43, pp. 195-204.

[Columbia, 2000], document du *Oral History Research Office* de Columbia University, 2000, http://www.columbia.edu/cu/librairies/indiv/oral/interviewing.html.

[Compagnon, A., 1998], Le démon de la théorie – Littérature et sens commun, Paris, Seuil, coll. La couleur des idées, 1998, 311p.

[Comte, A., 1844, 1963], Discours sur l'esprit positif, 1ère édition : Paris, 1844 ; réédition : Paris, 10/18, 1963, 185p.

[Cooper, N. G., 1987, 1989], From Cardinals to Chaos, ed. by N. G. Cooper, Los Alamos Science, Special issue, 1987 ; Cambridge University Press, 1989, 320p.

[Coquillard, P. et Hill, D. R. C., 1997], Modélisations et simulations d'écosystèmes, Paris, Masson, 1997.

[Cordeschi, R. et Numerico, T., 2003], "ARTORGA : The Artificial Organisms Research Group and Ashby's legacy", présentation faite à Pise, les 14 et 15 novembre 2003, accessible à l'adresse suivante : http://www3.humnet.unipi.it/cybernetics/docs/cordeschi_numerico.ppt.

[Corner, E. J. H., 1964, 1970], La vie des plantes, édition américaine : 1964, sans lieu ; traduction complétée par l'index de Paule Corsin : Paris, Stock, coll. « La grande encyclopédie de la nature », 1970, 383p.

[Cossa, P., 1955, 1957], La cybernétique – Du cerveau humain aux cerveaux artificiels, Paris, Masson, collection Evolution des sciences, 1ère édition : 1955 ; 2ème édition revue et corrigée : 1957, 102p.

[Coste, R., 1958], « Perspectives ouvertes par les recherches agronomiques pour l'amélioration de la production caféière dans l'Union Française », Café, Cacao, Thé, vol. 2, n°2, mai-août 1958, pp. 59-67.

[Costes, E., Guédon, Y., Lichou, J., Reffye (de), Ph., 1992], "Stochastic Modelling of Plant Growth", Actes du congrès GERB, 1992, pp. 41-46.

[Costes, E., Reffye (de), Ph., Lichou, J., Guédon, Y., Audubert, A. et Jay, M., 1992], "Stochastic modelling of apricot growth units and branching". 3rd Int. Symposium on Computer Modelling in Fruit Research and Orchard Management, New Zealand, Palmerston North, Acta Horticulturae, 313, 1992, pp. 89-98.

[Couffignal, L., 1963], La cybernétique, Paris, PUF, QSJ, 1963, 128p.

[Cournot, A. A., 1838-1877, 1958], Critique philosophique – Textes choisis, sélection d'extraits par Claude Khodoss, Paris, PUF, 1958, 237p.

[Cousin, R. et Poupardin, D., 1996], Entretien avec Roger Cousin mené le 22 mai et le 11 octobre 1996 à Versailles par Denis Poupardin pour le compte des Archorales-INRA (Archives orales de l'INRA), 13 pages, accessible sur le site http://www.inra.fr/archorales/

[Cox, D. R., 1958], Planning of Experiments, New-York, Wiley and Sons, 1958.

[Cox, D. R.,1962], Renewal theory, London, Chapman and Hall, U. K., 1962, 142p.

[Cox, D.R. et Lewis, P.A.W., 1966, 1969], The statistical Analysis of Series of Events, London, Methuen and Co. Ltd; traduction : L'analyse statistique des séries d'événements, Paris, Dunod, 1969, 271p.

[CTHS, 1992], L'image et la science, Actes du 115ème congrès national des sociétés savantes, Avignon, 1990, Paris, Editions du CTHS, 1992, 430p.

[Dagognet, F., 1955], Philosophie biologique, Paris, PUF, coll. Initiation philosophique, 1955, 107p.

[Dagognet, F., 1969, 2002], Tableaux et langages de la chimie – Essai sur la représentation, Paris, Seuil, 1969 ; réédition : Champ-Vallon, coll. Milieux, 2002, 211p.

[Dagognet, F., 1970], Le catalogue de la vie – Etude méthodologique sur la taxinomie, Paris, PUF, 1970, 189p.

[Dagognet, F., 1973a], Des révolutions vertes – Histoire et principes de l'agronomie, Paris, Hermann, 1973, 182p.

[Dagognet, F., 1973b], Ecriture et iconographie, Paris, Vrin, 1973, 171p.

[Dagognet, F., 1975, 2000], Pour une théorie générale des formes, Paris, Vrin, 1975 ; réimpression : Vrin, 2000, 195p.

[Dagognet, F., 1977], Une épistémologie de l'espace concret, Paris, Vrin, 1977, 223p.

[Dagognet, F., 1979], Mémoire pour l'avenir – Vers une méthodologie de l'informatique, Paris, Vrin, 1979, 201p.

[Dagognet, F., 1984a], Philosophie de l'image, Paris, Vrin, 1984, 255p.

[Dagognet, F., 1984b], Le nombre et le lieu, Paris, Vrin, 1984, 212p.

[Dagognet, F., 1985], Rematérialiser, Paris, Vrin, 1985, 268p.

[Dagognet, F., 1988], La maîtrise du vivant, Paris, Hachette, 1988, 202p.

[Dagognet, F., 1990], Corps réfléchis, Paris, Editions Odile Jacob, 1990, 272p.

[Dagognet, F., 1993], Réflexions sur la mesure, Paris, Encre marine, 1993, 189p.

[Dagognet, F., 1994], Le trouble, Paris, Les empêcheurs de penser en rond, Synthélabo, 1994, 194p.
[Dagognet, F., 1997], Georges Canguilhem – Philosophe de la vie, Paris, Les empêcheurs de penser en rond, Synthélabo, 1997, 201p
[Dagognet, F., 1998], Savoir et pouvoir en médecine, Paris, Les empêcheurs de penser en rond, Synthélabo, 1998, 288p
[Dagognet, F., 1999], Les outils de la réflexion – Epistémologie, Paris, Les empêcheurs de penser en rond, 1999, 430p.
[Dagognet, F., 2001], Philosophie d'un retournement, Paris, Encre marine, 2001, 117p.
[Dahan-Dalmedico, A. *et al.*, 1992], Chaos et déterminisme, Paris, Seuil, 1992, 416p.
[Dahan-Dalmedico, A. et Peiffer, J., 1986, 1996], Une histoire des mathématiques – Routes et dédales, Paris, Seuil, 1986 ; Seuil-Points, 1996, 314p.
[Dahan-Dalmedico, A., 2003], « Modèles et modélisations : le foisonnement des pratiques contemporaines exige une réflexion théorique nouvelle », Lettre du SPM (Département des Sciences Physiques et Mathématiques du CNRS), n°42, décembre 2003, pp. 26-28.
[Dahl, O. J. et Nygaard, K., 1966], "SIMULA – an ALGOL-based Simulation Language", Communications of the ACM, vol. 9, n°9, September 1966, pp. 671-678.
[Damien, R., 1995], Bibliothèque et État, Paris, PUF, 1995, 317p.
[Damien, R., 1998], François Dagognet médecin épistémologue philosophe – une philosophie à l'œuvre, collectif sous la direction de Robert Damien, Paris, Les empêcheurs de penser en rond, 1998, 303p.
[Danchin, A., 1998], La barque de Delphes, Paris, Editions Odile Jacob, 1998, 396p.
[Danchin, A., 2003], « Biologie théorique », texte de présentation des travaux d'Antoine Danchin par lui-même, accessible sur le site http://www.pasteur.fr/recherche/unites/REG/AD/Antoine_Danchin.html.
[Dantzig, G. B., 1965], "New mathematical methods in the life sciences", in [Stacy, R. W. and Waxman, B., 1965, 1969], pp. 33-46.
[Dauphiné, A., 1987], Modèles de simulation en géographie, Paris, Economica, 1987, 187p.
[Dauphiné, A., 1995], Chaos, fractales et dynamiques en géographie, Montpellier, GIP Reclus, 1995, 135p.
[Dauphiné, A., 2003], « Les réseaux urbains : un exemple d'application de la théorie des systèmes auto-organisés critiques », Annales de Géographie, n°631, juin 2003, pp. 227-342.
[Dauzat, J., 1993], "Simulated Plants and Radiative Transfer Simulations", Colloque Saumane, 1993, communication personnelle, 8p.
[Dauzat, J., 1994], "Radiative Transfer Simulation on Computer Models of *Elaeis guineensis*", Oléagineux, vol. 49, n°3, 1994, pp. 8-90.
[Dauzat, J., Hautecoeur, O., 1991], « Simulation des transferts radiatifs sur maquettes informatiques de couverts végétaux », Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing, European Space Agency (ESA), Courchevel, France, 14-18 january 1991; J. J. Hunt Ed., 1991, pp. 415-418.
[David, A., 1965], La cybernétique et l'humain, Paris, Gallimard, 1965, 185p.
[David, P. et Samadi, S., 2000], La théorie de l'évolution – Une logique pour la biologie, Paris, Champs-Flammarion Université, 2000, 312p.
[Daviero, V., Meyer-Berthaud, B., Lecoustre, R., 2000], "Computer simulation of sphenopsid architecture. I. Principles and methodology", Review of Palaeobotany and Palynology, 109, 2000, pp. 121-134.
[Davies, P., 1992], The Mind of God, New-York, Simon & Schuster, 1992. Traduction de Paul Couturiau : L'esprit de Dieu, Paris, éditions du rocher, 1995, réédité dans la collection Pluriel-Hachette littératures, 1998. Cf. particulièrement les chapitres 4 : « mathématiques et réalité » et 5 : « mondes réels et mondes virtuels ».
[Davis, P., 1998], "Remembering George Forsythe", SIAM News (Society for Industrial and Applied Mathematics), vol. 31, n°1, January-February 1998, accessible sur http://www.siam.org/siamnews/01-98/forsythe.htm, 6 pages.
[Dawkins, R., 1976, 1989, 1996, 2003], The selfish gene, Oxford University Press, 1976 ; seconde édition : 1989 ; traduction : Le gène égoïste, Paris, Odile Jacob, 1996 ; réimpression : Odile Jacob – Poches, 2003, 459p.
[Debray, R., 1991, 2001], Cours de médiologie générale, Paris, Gallimard, 1991 ; réédition augmentée d'une postface : Paris, 2001, 555p.
[Debray, R., 1992, 2000], Vie et mort de l'image, Paris, Gallimard, 1992 ; Folio essais, 2000, 526p.
[Debru, C., 1998], Philosophie de l'inconnu : le vivant et la recherche, Paris, PUF, 1998, 443p.
[Delahaye, J. P., 2002], L'intelligence et le calcul, Paris, Belin-Pour la science, 2002, 192p.
[Delattre, P. et Thellier, M., 1979], Elaboration et justification des modèles, Actes du colloque de 1978, Paris, Maloine, 1979, 2 tomes.
[Delavenay, E., 1959], La machine à traduire, Paris, PUF, QSJ, 1959, 128p.
[Deléage, J. P., 1991], Histoire de l'écologie, Paris, La Découverte, 1991.
[Deledalle, G., 1995], La philosophie peut-elle être américaine ?, Paris, J. Grancher, 1995, 304p.

[Deleuze, Ch., 1996], Pour une dendrométrie fonctionnelle : essai sur l'intégration des connaissances écophysiologiques dans les modèles de production ligneuse. Thèse, Université Claude Bernard, Lyon I, France, 305p.

[Deleuze, G. et Guattari, F., 1980], Mille plateaux – Capitalisme et shizophrénie, Paris, Editions de Minuit, 1980, 645p.

[Deleuze, G. et Guattari, F., 1991], Qu'est-ce que la philosophie ?, Paris, Editions de Minuit, 1991, 207p.

[Deleuze, G., 1962, 1991], Nietzsche et la philosophie, 1ère édition : 1962, 8ème édition : 1991, Paris, PUF, 232p.

[Deleuze, G., 1969, 1982], Logique du sens, Paris, Editions de Minuit, 1969 ; réimpression : 1982, 392p.

[Deleuze, G., 1988], Le pli – Leibniz et le baroque, Paris, Editions de Minuit, 1988, 192p.

[Deliège, C., 1995], « Du sérialisme à l'informatique musicale », in Les cahiers du Centre International de Recherches en Esthétique Musicale (CIREM), Université de Tours, 1995, pp. 67-80.

[Demarly, Dattée, Kammacher, Essad, 1975], « Rapport sur la Thèse de M. Philippe Verchère de Reffye », Université Paris-Sud, Centre d'Orsay, Doctorat de 3ème cycle en amélioration des plantes, soutenu le 22 septembre 1975, 3 pages.

[Demarly, Y. et Poupardin, D., 1996], Entretien avec Yves Demarly mené le 18 juillet 1996 à Versailles par Denis Poupardin pour le compte des Archorales-INRA (Archives orales de l'INRA), 16 pages, accessible sur le site http://www.inra.fr/archorales/

[Demarne, P. et Rouqueyrol, M., 1959, 1967], Les ordinateurs électroniques, 1ère édition : 1959, 4ème édition mise à jour : 1967, Paris, PUF, QSJ, 127p.

[Demarne, P. et Rouqueyrol, M., 1959, 1998], Les ordinateurs, 10ème édition mise à jour du livre précédent : 1998, Paris, PUF, QSJ, 126p.

[Demeure, R. J., 1999], « Physique IRM – IRM d'aujourd'hui et de demain », Louvain Médical, 1999, vol. 118, pp. 107-113.

[Denis, H., 1966, 1988], Histoire de la pensée économique, Paris, PUF, 1966 ; 8ème édition : 1988, 743p.

[Dennett, D.C., 1995a], "Artificial Life as Philosophy", in Artificial Life : an Overview, ed. by C. Langton, MIT Press, Cambridge, 291-292.

[Dennett, D.C., 1995b, 2000], Darwin's Dangerous Idea. Evolution and the Meanings of Life, Simon & Schuster, 1995; traduction : Darwin est-il dangereux ?, Paris, Odile Jacob, 2000, 657p.

[Desanti, J. T., 1975], La philosophie silencieuse ou critique des philosophies de la science, Paris, Seuil, 1975, 285p.

[Desanti, J.T., 1968], Les idéalités mathématiques, Paris, Seuil, 1968, 319p.

[Descamps, C., 1986], Les idées philosophiques contemporaines en France, Paris, Bordas, coll. Philosophie présente, 1986, 192p.

[Descombes, V., 1979], Le même et l'autre – Quarante-cinq ans de philosophie française (1933-1978), Paris, Editions de Minuit, 1979, 224p.

[Desrosières, A., 1993], La politique des grandes nombres. Histoire de la raison statistique, Paris, La Découverte & Syros, 1993 ; réédition en poche, 2000, 460p.

[Desrosières, A., 1999], article « Statistiques », in Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences, dir. D. Lecourt, Paris, PUF, 1999, pp. 874-880.

[Deutsch, D., 1997, 2003], The Fabric of Reality, London, Penguin Books, 1997 ; traduction : L'étoffe de la réalité, Paris, Cassini, 2003, 446p.

[Di Paolo, E.A. *et al.,* 2000], "Simulation Models as Opaque Thought Experiments". In Artificial Life VII, Proc. of the 7th Intern. Conf. on Artificial Life, ed. by Mark A. Bedau *et al*., MIT Press, Cambridge, 497-506.

[Didi-Huberman, G., 1990, 2001], Devant l'image, Paris, Editions de Minuit, 1990 ; réimpression : 2001, 333p.

[Didi-Huberman, G., 1992], Ce que nous voyons et ce qui nous regarde, Paris, Editions de Minuit, 1992, 209p.

[Dieguez (de), M., 1981], L'idole monothéiste, Paris, PUF, 1981, 263p.

[Diehl, R., 1964, 1965], La sélection végétale, Paris, PUF, QSJ, 1ère édition : 1964 ; 2ème édition : 1965, 126p.

[Diener, F. et Diener, M., 1989], « Les applications de l'analyse non standard », La Recherche, 1989, vol. 20, n°206, pp. 68-83.

[Dietrich, M. R., 1996], "Monte-Carlo Experiments and the Defense of Diffusion Models in Molecular Population Genetics", Biology and Philosophy, vol. 11, n°3, july 1996, pp. 339-356.

[Dilthey, W., 1883, 1942], Einleitung in die Geisteswissenschaften, Leipzig, 1883 ; traduction : Introduction à l'étude des sciences humaines, Paris, PUF, 1942, 525p.

[Dilthey, W., 1924, 1947], Die Geistige Welt, Leipzig & Berlin, 1924 ; traduction : Le monde de l'esprit, Tome I, Paris, Aubier, 426p.

[Dixon, J., 1960], "Some Statistical Uses of Large Computer", Proc. of the 4th Berkeley Symposium on Mathematical Statistic and Probability, vol. 4, University of California, 1960, pp. 197-209.

[Djindjian, F., 1991], Méthodes pour l'archéologie, Paris, Armand Colin, 1991, 405p.

[Dormy, E., 1996], « Introduction aux expériences numériques », Revue du Palais de la Découverte, février 1996, n°235, pp. 27-41.

[Dosse, F., 1992], Histoire du structuralisme, Tome I : 1992, 472p., Tome II : 542p., Paris, La Découverte, 1992.

[Dosse, F., 1995, 1997], L'empire du sens – L'humanisation des sciences humaines, Paris, La Découverte, 1995 ; réimpression : La Découverte/Poche, 1997, 432p.

[Dreyfus, Ph., 1999], « Diversité des approches fonctionnelles de la dynamique et de la production des peuplements : intérêts pour la gestion sylvicole », Revue Forestière Française, 1999, vol. 2, édition spéciale des 50 ans, pp. 281-297.

[Drogoul, A., 2002a], « La programmation orientée objet », cours de DEA d'Alexis Drogoul, Université Paris 6, accessible sur http://miriad.lip6.fr/~drogoul/cours/gla/OODesign.GLA.pdf, 143 transparents.

[Drogoul, A., 2002b], « L'intelligence artificielle distribuée », cours d'Alexis Drogoul, DESS d'IA de l'Université Paris 6, accessible sur http://miriad.lip6.fr/~drogoul/cours/ia/IA_SMA.pdf, 44 transparents.

[Droit, R. P., 1990], Science et philosophie, pour quoi faire ?, Paris, Le Monde – éditions, 1990, 372p.

[Drouin, J. M., 1991], L'écologie et son histoire (réinventer la nature), Paris, Desclée de Brouwer, 1991, chapitre II : « Modèles », pp. 109-149 de l'édition Champs-Flammarion, 1993, 218p.

[Dubois, M., 1999], Introduction à la sociologie des sciences, Paris, PUF, coll. Premier Cycle, 321p.

[Duboz, R., 2004], Intégration de modèles hétérogènes pour la modélisation et la simulation de systèmes complexes – Application à la modélisation multi-échelles en écologie marine, Thèse d'informatique, Université du Littoral, 2004, 207p.

[Dubucs, J., 2002], « Simulations et modélisations », Pour la science, n°300, octobre 2002, 3p.

[Duby, G. et Abeles, M., 1975], « Histoire-société-imaginaire », entretien de M. Abeles avec G. Duby, Dialectiques, Automne 1975, n°10-11, pp. 111-123.

[Duby, G., 1973], Le dimanche de Bouvines, Paris, Gallimard, 1973.

[Duchesneau, F., 1998], Les modèles du vivant de Descartes à Leibniz, Paris, Vrin, 1998, 402p.

[Dufourt, H., 1995], « Les fonctions paradigmatiques de la musique chez Leibniz », in Les cahiers du Centre International de Recherches en Esthétique Musicale (CIREM), Université de Tours, 1995, pp. 7-65.

[Dugas, R., 1959], La théorie physique au sens de Boltzmann, Neuchâtel - Suisse, éditions du Griffon, distribution : Dunod – Paris, 1959, 308p.

[Duhem, P., 1914], La théorie physique – son objet – sa structure, Paris, 1914 ; réédition dans la collection Vrin, 1989.

[Dumas, R., 2002], Traité de l'arbre – essai d'une philosophie occidentale, Paris, Actes Sud, 2002, 256p.

[Dumouchel, P. et Dupuy, J. P., 1983], L'auto-organisation – De la physique à la politique, Colloque de Cerisy, Paris, Seuil, 1983, 562p.

[Dupuy, G., 1991], L'urbanisme des réseaux, Paris, Armand Colin, 1991, 198p.

[Dupuy, J. P., 1992], Introduction aux sciences sociales – Logique des phénomènes collectifs, Paris, Ellipses, 1992, 297p.

[Dupuy, J. P., 2000], Les savants croient-ils en leur théorie ?, Paris, INRA-édition, 2000, 133p.

[Durand, G., 1964], L'imagination symbolique, Paris, PUF, coll. Initiation Philosophique, 1964, 129p.

[Durand, G., 1969, 1992], Les structures anthropologiques de l'imaginaire, Paris, Bordas, 1969 ; onzième édition : Paris, Dunod, 1992, 536p.

[Duverger, M., 1959, 1963], Méthodes des sciences sociales, 1ère édition : 1959, 3ème édition : 1963, Paris, PUF, « Thémis », 501p.

[Dzierzon, H. et Kurth, W., 2002], "LIGNUM : A Finnish tree growth model and ist interface to the French AMAPmod database", Scales, Hierarchies and Emergent Properties in Ecological Models, Franz Hölker (ed.), Frankfurt am Main, Peter Lang, 2002, pp. 29-46.

[Eco, U., 1962, 1965, 1979], Opera Aperta, Milan, Bompiani, 1962 ; traduction : L'œuvre ouverte, Paris, Seuil, 1965 ; réimpression : Seuil-Points, 1979, 316p.

[Eco, U., 1985, 1989], La guerre du faux, Paris, Grasset & Fasquelle, 1985 ; réimpression : Livre de Poche, Biblio-essais, 1989, 382p.

[Ecological Modelling, (volume), (numéro), (année)], Ecological Modelling, revue fondée par S.E. Jorgensen, paraissant à partir de 1975.

[Edelin, C., 1977], Images de l'architecture des conifères. Th. Doct. 3ème cycle en biologie végétale, Université Montpellier II, France, 255p.

[Eden, M., 1958], "A probabilistic model for morphogenesis", Symposium on Information Theory in Biology, New York, Pergamon Press, 1958.

[Eden, M., 1960], "A two-dimensional growth process", Fourth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, Berkeley, University of California Press, 1960.

[EDP, 1998], Modélisation mathématique et simulation numérique, compte-rendu des 3èmes Entretiens de la Physique des 17 et 18 septembre 1999, « échanges physique industrie n°4 », EDP, Les Ulis, 1999, 60p.

[Edwards, P. N., 2002], « Pourquoi fabriquer des ordinateurs ? », La Recherche, Hors-Série, n°7, avril-juin 2002, pp. 21-26.

[Einstein, A., 1933, 1934], "On the Method of Theoretical Physics", conférence donnée à Oxford le 10 juin 1933 ; réimpression : Philosophy of Science, 1934, vol.1, n°2, pp. 163-169.

[Einstein, A., 1979, 1989], Comment je vois le monde, Traductions de diverses conférences d'Albert Enstien, sans présentation ni lieux ni dates, Paris, Flammarion, 1979 ; réimpression : Champs-Flammarion, 1989, 191p.

[Ekeland, I., 1984], Le calcul, l'imprévu – Les figures du temps de Képler à Thom, Paris, Seuil, 1984, 169p.

[Ekeland, I., 1991], Au hasard, Paris, Seuil, 201p.

[Ekeland, I., 1995], Le chaos, Paris, Flammarion, « domino », 1995, 123p.

[Emery, A., 1934], "Dialectics versus Mechanics – A communist Debate on Scientific Method", Philosophy of Science, 1935, vol. 2, n°1, pp. 9-38.

[Emmeche, C., 1994], The Garden in the Machine, première édition en danois : 1991 ; traduction de Steven Sampson, Princeton, Princeton University Press, 1994, 199p.

[Engel, P., 1996], Philosophie et psychologie, Paris, Folio-essais, 1996, 473p.

[Engel, P., 1989], La norme du vrai – Philosophie de la logique, Paris, NRF essais, 1989, 492p.

[Engels, F., 1873-1876, 1925, 1952], La dialectique de la nature, manuscrits posthumes datant de 1873-1876, première édition à Moscou : 1925, Paris, Editions Sociales, 1952, 367p.

[Engels, F., 1877-1878, 1963], Anti-Dühring, Paris, Editions Sociales, 1963, 511p.

[EPHE, 1978], La morphogenèse : de la biologie aux mathématiques, actes de trois colloques interdisciplinaires organisés par l'Ecole Pratique des Hautes Etudes et sous la direction de Y. Bouligand en janvier, mars et octobre 1978, Paris, édition Maloine, coll. Recherches Interdisciplinaires », 1980, 199p.

[Erceau, J. et Ferber, J., 1991], « L'intelligence artificielle distribuée », La recherche, n°233, juin 1991, pp. 750-758.

[Erickson, R. O., 1966], "Relative Elemental Rates and Anisotropy of Growth in Area : a Computer Programme", Journal of Experimental Botany, 1966, vol. 17, n° 51, May 1966, pp. 390-403.

[Erickson, R. O., 1976], "Modeling of Plant Growth", Annual Review of Plant Physiology, 1976, vol. 27, pp. 407-434.

[ESS, 2001], Simulation in industry, Proc. of the 13th European Simulation Symposium, Marseille, October 18-20th, 2001, ed. by N. Giambiasi and C. Frydman, SCS Europe Bvba, Ghent, 2001, 984p.

[Esterle, A. et Schaffar, L., 1994], Organisation de la recherche et conformisme scientifique, Paris, PUF, 1994, 327p.

[Evans, G. W., Wallace, G. F. and Sutherland, G. L., 1967], Simulation Using Digital Computers, Englewood Cliffs, N. J., Prentice-Hall, Inc., 1967.

[Evans, J. B., 1988], Structures of Discrete Event Simulation – An Introduction to the Engagement Strategy, New York, John Wiley and Sons, Ellis Horwood Books in Computer Science, 1988.

[Fagot-Largeault, A., 2002], « L'explication dans les sciences de la vie et de la santé, 6 : Formes », 2 pages, plan détaillé et résumé du cours sur les formes dans les sciences de la vie, professé au Collège de France le 18 décembre 2002, accessible sur http://www.college-de-france.fr.

[Fatès, N., 2001], Les automates cellulaires : vers une nouvelle épistémologie ?, Mémoire de DEA d'histoire et de philosophie des sciences, sous la direction de J. Mosconi, Paris I, 2001, 51p., accessible sur http://nazim.fates.free.fr/.

[Faure, R., 1979], La programmation linéaire appliquée, Paris, PUF, QSJ, 1979, 128p.

[Faure, R., Boss, J. P. et Le Garff, A., 1961, 1967], La recherche opérationnelle, Paris, PUF, QSJ, 1ère édition : 1961, 3ème édition : 1967, 128p.

[Faye, J. P., 1996, 2002], Le siècle des idéologies, Paris, Armand Colin/Masson, 1996 ; réédition : Armand Colin, coll. Pocket-Agora, 2002, 252p.

[Fedi, L. et Salanskis, J. M., 2001], Les philosophies françaises et la science : dialogue avec Kant, Cahiers d'Histoire et de Philosophie des Sciences, n°50, Paris, ENS éditions, 2001, 250p.

[Feltz, B., 1991], Croisées biologiques, Bruxelles, éditions Ciaco, 1991, 338p.

[Feltz, B., 1999], Auto-organisation et émergence dans les sciences de la vie, collectif dirigé par B. Feltz, M. Crommelinck et Ph. Goujon, Bruxelles, Ousia, 1999, 511p.

[Fenstad, J. E. *et al.*, 1989], Logic, Methodology and Philosophy of Science VIII, Proc. of the 8th International Congress for Logic, Methodology and Philosophy of Science, ed. by J. E. Fenstad, Elsevier Science Publishers, 1989.

[Ferber, J., 1995], Les systèmes multi-agents – Vers une intelligence collective, Paris, InterEditions, 1995, 1997 nouvelle présentation, 522p.

[Fernandez Ostolaza, J., Moreno Bergareche, A., 1992, 1997], Vida artificial, Madrid, Eudema, 1992 ; traduction : La vie artificielle, Paris, Seuil, 1997, 151p.

[Ferraro, P., Godin, C., 2000], "A distance measure between plant architectures", Annals of Forest Science, 57, 2000, pp. 445-461.

[Ferry, L. et Renaut, A., 1986, 1988], La pensée 68 – Essai sur l'anti-humanisme contemporain, Paris, Gallimard, 1986 ; Gallimard, Folio-essais, 1988, 347p.

[Feuvrier, C. V., 1971], La simulation des systèmes, Paris, Dunod, 1971, 152p.

[Feyerabend, P., 1975, 1979, 1988], Against Method, London, New Left Books, 1975 ; traduction : Contre la méthode, Paris, Seuil, 1979 ; réédition : Seuil-Points, 1988, 350p.

[Fichant, M. et Pécheux, M., 1969], Sur l'histoire des sciences, Paris, Maspéro, 1969.

[Fichant, M., 1973, 2000], « L'épistémologie en France », in Le XXème siècle – Histoire de la philosophie tome VIII, sous la direction de François Châtelet, 1ère édition : Paris, Librairie Hachette, 1973 ; deuxième édition : Paris, Hachette Littérature, collection Pluriel, 2000, pp. 135-178.

[Fischer, J. L. et Schneider, W. H., 1990], Histoire de la génétique – Pratiques, Techniques et Théories, actes du Colloque International d'Histoire de la Génétique, Paris, 19-22 mai 1987, Paris, ARPEM et Editions Sciences en Situation, 1990, 310p.

[Fisher, J. B., Honda, H., 1977], " Computer simulation of branching pattern and geometry in *Terminalia (Combretaceae)*, a tropical tree", Botanical Gazette, 138 (4), pp. 377-384, 1977.

[Fisher, J. B., Honda, H., 1979a], "Branch geometry and effective leaf area : a study of *Terminalia* branching pattern, 1. Theoretical Trees", American Journal of Botany, 1979, 66 (6), pp. 633-644.

[Fisher, J. B., Honda, H., 1979b], "Branch geometry and effective leaf area : a study of *Terminalia* branching pattern, 2. Survey of Real Trees", American Journal of Botany, 1979, 66 (6), pp. 633-644.

[Fisher, J.B., 1992], "How predictive are computer simulations of tree architecture ?", International Journal of Plant Sciences,153 (3), pp. 137-146.

[Fisher, R. A., 1921a], "Studies in Crop Variation. I. An Examination of the Yield of Dressed Grain from Broadbalk", Journal of Agricultural Sciences, 1921, vol. 11, pp. 107-135.

[Fisher, R. A., 1921b], "Some Remarks of the Methods Formulated in a Recent Article on 'The Quantitative Analysis of Plant Growth'", Annals of Applied Biology, 1921, vol. 7, pp. 367-372.

[Fisher, R. A., 1922], "On the Mathematical Foundations of Theoretical Statistics", Philosophical Transactions of the Royal Society of London, A, 1922, vol. 222, pp. 309-368.

[Fisher, R. A., 1925, 1947], 1ère édition : 1925, Statistical Methods for Research Works, Edinburgh, Oliver and Boyd ; traduction de I. Bertrand : Les méthodes statistiques adaptées à la méthode scientifique, Paris, PUF, 1947.

[Fisher, R. A., 1925], "Theory of Statistical Estimation", Proc. of the Cambridge Philosophical Society, 1925, vol. 22, pp. 700-725.

[Fisher, R. A., 1926], "The Arrangement of Field Experiments", Journal of the Ministry of Agriculture of Great Britain, 1926, vol. 33, pp. 505-513.

[Fisher, R. A., 1930], "Inverse Probability", Proc. of the Cambridge Philosophical Society, 1930, vol. 26, pp. 528-535.

[Fisher, R. A., 1934], "Indeterminism and Natural Selection", Philosophy of Science, 1934, vol. 1, n°1, pp. 99-117.

[Fisher, R. A., 1948], "Biometry", Biometrics, 1948, vol. 4, pp. 217-219.

[Fisher, R. A., 1950], "Creative Aspects of Natural Law", The Eddington Memorial Lecture, Cambridge University Press, 1950, pp. 1-23.

[Fisher, R. A., 1959], "Mathematical Probability in the Natural Sciences", Technometrics, 1959, vol. 1, pp. 21-29.

[Fisher, R. A., 1962], "The Place of the Design of Experiments in the Logic of Scientific Inference", Colloques internationaux du CNRS, Paris, 1962, n°110, pp. 13-19.

[Fleury, V. et Bouligand, Y., 2004], Les formes de la vie, Pour la science, Dossier hors-série, dirigé par Vincent fleury et Yves bouligand, juillet-septembre 2004, 120p.

[Fleury, V, Watanabe, T., Nguyen, T. H. et Unbekandt, M., 2003], « La complexité des organes », Pour la science, décembre 2003, n°314, pp. 98-103.

[Fleury, V., 1998], Arbres de pierre – La croissance fractale de la matière, Paris, Flammarion, Nouvelle Bibliothèque Scientifique, 1998, 334p.

[Fodor, J., 2000, 2003], The Mind doesn't Work that Way, MIT Press, 2000 ; traduction : L'esprit, ça ne marche pas comme ça, Paris, Odile Jacob, 2003, 213p.

[Font, J. M. et Quiniou, J. C., 1968], Les ordinateurs – mythes et réalités, Paris, Gallimard, Idées NRF, 1968, 187p.

[Forrester, J. W., 1968, 1984], Principles of Systems, Wright Allen Press, Inc., 1968 ; traduction de P. Sylvestre-Baron : Principes des systèmes, Lyon, PUL, 1984 (3ème édition).

[Forrester, J. W., 1969, 1979], Urban Dynamics, Cambridge, MIT Press, 1969 ; traduction : Dynamique urbaine, Paris, Economica, 1979, 329p.

[Foucault, M., 1966, 1990], Les mots et les choses, Paris, Gallimard, 1966 ; réimpression : TEL/Gallimard, 1990, 400p.

[Foucault, M., 1969, 1997], L'archéologie du savoir, Paris, Gallimard, 1969 ; réimpression : NRF/Gallimard, coll. Bibliothèque des sciences humaines, 1997, 279p.

[Fourcaud, Th., 1993], « Modélisation mécanique de la croissance des végétaux », Colloque national en calcul des structures, Giens (France), 11-14 mai 1993, Hermès 1993, pp. 131-148.

[Fournier, A., 1987], "Prolegomenon in modelling of natural phenomena", Course notes 16, Siggraph'87, Anaheim.

[Fournier, C. et Andrieu, B., 1997], « Utilisation de l'approche L-système pour la modélisation architecturale du développement du maïs », [INRA-Grignon, 1997], pp. 203-211.

[Fournier, C. et Andrieu, B., 1998], “A 3D Architectural and Process-Based Model of Maize Development”, Annals of Botany, 1998, vol. 81, pp. 233-250.

[Fournier, C. et Andrieu, B., 2000], “Dynamics of the Elongation of the Internodes in Maize (*Zea mays L.*) : Analysis of Phases of Elongation and their Relationships to Phytomer Development”, Annals of Botany, 2000, vol. 86, pp. 551-563.

[Fournier, C., 2000], « Modélisation des interactions entre plantes au sein des peuplements. Application à la simulation des régulations de la mophogenèse aérienne du maïs (*Zea mays L.*) par la compétition pour la lumière », Résumé de thèse, 2000, accessible sur http://www.inra.fr/thses/resumes/fournier.html.

[Franc, A. *et al.*, 2000], Une introduction à la modélisation des forêts hétérogènes, Franc, A., Gourlet-Fleury, S. et Picard, N., Nancy, ENGREF, 2000, 312p.

[Franc, A., Besnard, J., Klein, E., 1995], « Simulation de la dynamique des peuplements forestiers hétérogènes : quelques pistes à l’aide de modèles simples », Revue Forestière Française, vol. XLVII, n°spécial, 1995, pp. 183-191.

[Franck, A., 2002], D’un usage de la pensée mathématique – Clinique psychanalytique d’une potentialité psychotique, Ramonville-Saint-Agne, éditions érès, 2002, 167p.

[Françon, J. et Lienhardt P., 1994], “Basic principles of topology-based methods for simulating metamorphosis of natural objects”, in Magnenat Thalmann N et Thalmann D (eds): Artificial life and virtual reality, Chichester, U. K., John Wiley and Sons, pp. 23-44.

[Françon, J. et Reveilles, J. P., 1990], « De l’imagerie à la géométrie discrète », [CTHS, 1992], pp. 323-339.

[Françon, J. et Varenne, F., 2001], Entretien transcrit, 23p.

[Françon, J., 1984], « Arbres et nombres de Strahler dans diverses sciences », Revue du Palais de la Découverte, 1984, vol. 12, n°120, pp. 29-36.

[Françon, J., 1991], « Sur la modélisation informatique de l’architecture et du développement des végétaux ». In Edelin C., éd., 2ème Colloque international sur l’arbre, 10-15 sept. 1990, Naturalia Monspeliensa, n° hors série A7, Montpellier, France, pp. 231-247.

[Françon, J., 1997a], « Un chercheur discret…dans un monde continu », un entretien électronique avec Jean Françon, publié dans GEDEON : revue de Géométrie Algorithmique : Dernières Nouvelles, n°29, 18 février 1997, pp. 1-6.

[Françon, J., 1997b], “Book review : The Algorithmic Beauty of Plants”, Plant Science 122 (1997), 109-110.

[Frankhauser, P. et Varenne, P., 2001], Entretien transcrit, 28p.

[Frankhauser, P., 1994], La fractalité des structures urbaines, Paris, Anthropos – Economica, 1994, 291p.

[Franquin, P., 1970], « Modèles mathématiques de structure chez les végétaux . I. Principes de structure et production de nombre », Cah. ORSTOM, série Biol., 1970, n°14, pp. 77-126.

[Franquin, P., 1972], « Modèles mathématiques de structure chez les végétaux . II. Relations de structure », Cah. ORSTOM, série Biol., 1972, n°17, pp. 3-21.

[Franquin, P., 1974], « Développement de la structure fondamentale ou développement morphogénétique de la plante », Cah. ORSTOM, série Biol., 1974, n°23, pp. 23-30.

[Fréchet, M., 1955], Les mathématiques et le concret, Paris, PUF, 1955, 438p.

[Frege, G., 1892, 1971, 1994], « Sinn und Bedeutung », Zeitschrift für Philosophie und philosophische Kritik, 100, 1892 ; traduction et commentaire de cet article, « Sens et dénotation », par Claude Imbert, publié dans Ecrits logiques et philosophiques : Paris, Seuil, 1971 ; réimpression : Seuil/Points, 1994, pp. 102-126.

[Frenkel, K. A., 1989], “An Interview with Ivan Sutherland”, Communications of the ACM, June 1989, Vol. 32, n°6, pp. 711-718.

[Freud, S., 1913, 1965, 1979], Totem et tabou, écrit en 1913 ; traduction : Paris, Payot, 1965 ; réimpression : Payot, coll. Petite bibliothèque, 1979, 186p.

[Freudenthal, H., 1961], The Concept and the Role of the Model in Mathematics and Natural and Social Sciences, Proc. of the Colloquium sponsored by the Division of Philosophy of Sciences of the International Union of History and Philosophy of Sciences organized at Utrecht, January 1960, by Hans Freudenthal (dir.), Dordrecht, D. Reidel Publishing Company, 1961, 194p.

[Friedländer, S., 1975], Histoire et psychanalyse – Essai sur les possibilités et les limites de la psychohistoire, Paris, Seuil, 1975, 237p.

[Galison, P., 1987], How Experiments End, Chicago and London, Chicago University Press, 1987, 330p.

[Galison, P., 1996], The Disunity of Science, ed. by Peter Galison and David J. Stump, Stanford, Stanford University Press, 1996, 567p.

[Galison, P., 1997], Image and Logic, Chicago, The University of Chicago Press, 1997, 955p.

[Garaudy, R., 1966], La pensée de Hegel, Paris, Bordas, 1966, 208p.

[Gardner, H., 1985, 1993], The Mind’s New Science – A History of the Cognitive Revolution, New York, Basic Books Inc. Publisher ; traduction : Histoire de la révolution cognitive, Paris, Payot, 1993, 487p.

[Garfinkel, D., 1962], “Digital Computer Simulation of Ecological Systems”, Nature, 194, 1962 (June), pp. 856-857.

[Garfinkel, D., 1965], “Computer simulation in biochemistry and ecology”, in [Waterman, T. H. and Morowitz, H. J., 1965], pp. 292-310.

[Garfinkel, D., 1969], “Simulation of glycolytic systems”, in [Heinmetz, F., 1969], pp. 1-74.

[Gastinel, N., 1970], Procédures ALGOL en analyse numérique, ouvrage collectif édité par N. Gastinel, faisant suite à [Kuntzman, J., 1967], Paris, CNRS, 1970, 172p.

[Gaudillière, J. P., 2002], Inventer la biomédecine, Paris, La Découverte, 2002, 392p.

[Gayon, J., 1987], « Génétique des populations et évolutionnisme : esquisse d’une histoire générale (1916-1980) », Cahiers d’Histoire et de Philosophie des Sciences, nouvelle série, n°22 : nouveaux objets pour l’histoire de la biologie, pp. 86-110.

[Gayon, J., 1992], Darwin et l’après-Darwin – Une histoire de l’hypothèse de sélection naturelle, Paris, Kimé, 1992, 457p.

[Gayon, J., 2000], “History of the Concept of Allometry”, American Zoologist, 2000, vol. 40, pp. 748-758.

[Georgescu-Roegen, N., 1979, 1995], La décroissance - Entropie – Ecologie –Economie, 1ère édition de ce recueil d’article conçue par J. Grinevald et I. Rens : Lausanne, Editions Pierre-Marcel Favre, 1979 ; réédition remaniée : Paris, Editions Sang de la terre, 1995, 254p.

[Gibbs, W., 2001], « La biologie virtuelle », Pour la science, octobre 2001, pp. 38-44.

[Giegerenzer, G., Swijtnik, Z., Porter, T. Daston, L., Beatty, J. and Krüger, L., 1989, 1997], The Empire of Chance – How probability changed science and everyday life, Cambridge, Cambridge University Press, Ideas in context, 1st published in 1989, reprinted in 1997, 340p.

[Gilbert, N. et Troitzsch, K.G., 1999], Simulation for the social scientist, Buckingham and Philadelphia, Open University Press, 1999, 273p.

[Gilbert, N., 1995], “Simulation : an emergent perspective”, disponible sur la page web du CRESS : Centre for Research on Simulation in the Social Sciences, at the Department of Sociology, University of Surrey, Guildford, UK.

[Gilbert, S. F., 1988], “Cellular politics : Ernest Everett Just, Richard B. Goldschmidt, and the Attempt to Reconcile Embryology and Genetics”, in The American Development of Biology, ed. by R. Rainger, K. R. Benson and J. Maienschein, Philadelphia, University of Pennsylvania Press, pp. 311-346.

[Gilles, B., 1978a], « Prolégomènes à une histoire des techniques », in Histoire des techniques, Paris, Gallimard, éd. Pléiade, 1978, pp. 1-118.

[Gilles, B., 1978b], « Essai sur la connaissance technique », in Histoire des techniques, Paris, Gallimard, éd. Pléiade, 1978, pp. 1416-1477.

[Gillois, M., 1997], « Les modèles dynamiques de l’évolution », in Pour Darwin, sous la direction de P. Tort, Paris, PUF, 1997, pp. 1035-1072.

[Giovannangeli, D., 2002], Finitude et représentation, Bruxelles, Ousia, 2002, 119p.

[Girault, M., 1959], Initiation aux processus aléatoires, Paris, Dunod, 1959, 107p.

[Givernaud, N., 1999], « Georges Teissier et la génétique des populations », article en ligne tiré d’un mémoire de DEA de l’université Paris 7, 1999, accessible à l’adresse : http://picardp1.ivry.cnrs.fr/~jfpicard/Teissier.html.

[Glass, R. L., Ramesh, V. et Vessey, I., 2004], “An Analysis of Research in Computing Disciplines”, Communications of the ACM, June 2004, vol. 47, n°6, pp. 89-94.

[Gleick, J., 1989], Chaos, New York, Viking Press, 1ère édition : 1987 ; traduction : La théorie du chaos, Paris, Albin Michel, 1989, 431p.

[Godin, C. et Guédon, Y., 1997], « Représentation et analyse de l’architecture des plantes », in [INRA-Grignon, 1997], pp. 39-44.

[Godin, C., Guédon, Y., Costes, E., 1999], “Exploration of a plant architecture database with the AMAPmod software illustrated on an apple tree hybrid family“, Agronomie, vol. 19, n°3/4, pp. 163-184.

[Goethe, J. W. von, 1790-1807, 1884, 1992], La métamorphose des plantes, traduction de H. Bideau, 1975, Paris, éditions Triades, réédition : 1992, 272p.

[Goffy, J. Y., 1988], La philosophie de la technique, Paris, PUF, 1988, 127p.

[Gohau, G., 1996], « Histoire des sciences du troisième type », Raison Présente, 3ème trimestre 1996, n°119, pp. 47-57.

[Golomb, S., 1954], “Checkerboards and polyominoes”, Amer. Math. Monthly, vol. 61 (1954), pp. 675-682.

[Gonseth, F., 1936, 1974], Les mathématiques et la réalité, nouveau tirage de l’édition de 1936, Paris, Albert Blanchard, 1974, 386p.

[Goodman, N., 1954, 1984], Fact, Fiction and Forecast, Indianapolis, Hackett Publishing Company, 1954 ; traduction : Faits, fiction et prédiction, Paris, Les éditions de minuit, 1984, 132p.

[Goodman, N., 1978, 1992], Ways of Worldmaking, Indianapolis, Hackett Publishing Company, 1978 ; traduction: Nîmes, éditions Jacqueline Chambon, 1992, 197p.

[Goody, J., 1997, 2003], Representations and Contradictions, Ambivalence Towards Images, Theatre, Fictions, relics and Sexuality, Blackwell Publisher (sans lieu), 1997 ; traduction : La peur des représentations : l’ambivalence à l’égard des images, du théâtre, de la fiction, des reliques et de la sexualité, Paris, Editions La Découverte, 2003, 310p.

[Gorenflot, R., 1998], Biologie végétale - Plantes supérieurs : appareil végétatif, Paris, Masson, 1ère édition : 1977, 2ème édition : 1998, 286p.

[Gosset (*alias* 'Student'), W. S., 1908], "The probable error of a mean", Biometrika, 6, 1908, pp. 1-25.

[Goudot-Perrot, A., 1967], Cybernétique et biologie, Paris, PUF, QSJ, 1967, 126p.

[Goujon, P., 1994a], « La biologie à l'ère de l'informatique. Connaissance et naissance de la vie artificielle », Première partie, Revue des Questions Scientifiques, 1994, 165 (1), pp. 53-84.

[Goujon, P., 1994b], « La biologie à l'ère de l'informatique. Connaissance et naissance de la vie artificielle », Seconde partie, Revue des Questions Scientifiques, 1994, 165 (2), pp. 119-153.

[Goulard, M., 1998], « La place de la modélisation mathématique ou informatique dans la problématique environnementale », Les dossiers de l'environnement de l'INRA, n°17: « Sciences de la société et environnement à l'INRA », INRA-éditions, décembre 1998, pp. 73-83.

[Grabar, A., 1957, 1984, 1998], L'iconoclasme byzantin, Paris, collection de la Fondation Gustave Schlumberger du Collège de France, 1957 ; 2ème édition revue et corrigée : Flammarion, 1984, réimprimée en Champs-Flammarion, 1998, 477p.

[Grandjouan, G., 1996], « Transposition géométrique ou simulation probabiliste ? Choix d'un modèle statistique des relations écologiques en milieu naturel », Tendances nouvelles en modélisation pour l'environnement, Actes du colloque CNRS des 16-17 janvier 1996 – Programme Environnement du CNRS, Paris, 1996, édition complète à diffusion restreinte, fascicule A des « communications orales », pp. 71-76.

[Granger, G. G., 1955, 1979], La raison, 1ère édition : 1955 ; 4ème édition : 1979, Paris, PUF, QSJ, 128p.

[Granger, G. G., 1960, 1967], Pensée formelle et sciences de l'homme, Paris, Aubier, 1960, 226p. ; 2ème édition : avec un avant-propos supplémentaire, 1967.

[Granger, G. G., 1968], Essai d'une philosophie du style, Paris, Armand Colin, 1968, 312p.

[Granger, G. G., 1979], Langages et épistémologie, Paris, Editions Klincksieck, 1979, 226p.

[Granger, G. G., 1988, 2003], « Simuler et comprendre », texte d'une conférence prononcée à Brighton en août 1988, in Philosophie, langage, science, Paris, EDP, 2003, pp. 187-192.

[Granger, G. G., 1990], « Epistémologie économique », in Encyclopédie économique, Tome I, éditée par X. Greffe, J. Mairesse et J. L. Reiffers, Paris, Economica, 1990, pp. 3-24.

[Granger, G. G., 1992], La vérification, Paris, Odile Jacob, 1992, 314p.

[Granger, G. G., 1993, 1995], La science et les sciences, Paris, PUF, QSJ, 1993 ; 2ème édition corrigée : 1995, 127p.

[Granger, G. G., 1994], Formes, opérations, objets, Paris, Vrin, 1994, 402p.

[Granger, G. G., 1995], Le probable, le possible et le virtuel, Paris, Odile Jacob, 1995, 248p.

[Granger, G. G., 1999], La pensée de l'espace, Paris, Odile Jacob, 1999, 238p.

[Granger, G. G., 2000], Sciences et réalité, Paris, Odile Jacob, 262p.

[Gras, A., 1997], Les macro-systèmes techniques, Paris, PUF, QSJ, 1997, 128p.

[Greene, N., 1989], "Voxel space automata : modelling with stochastic growth processes in voxel space", Computer Graphics, vol. 23 (3), pp. 175-184.

[Gregg, J. R. et Harris, F. T. C., 1964], Form and Strategy in Science – Studies dedicated to Joseph Henry Woodger on the Occasion of his Seventieth Birthday, ed. by J. R. Gregg and F. T. C. Harris, Dordrecht, D. Redidel Publishong Company, 1964, 476p.

[Grémy, J. P., 1989, 1995], « La simulation », article de l'Encyclopaedia Universalis, version de 1989 sur CD-ROM : 1995.

[Grenier, J. Y., Grignon, C. et Menger, P. M., 2001], Le modèle et le récit, collectif issu d'un séminaire qui s'est tenu de 1995 à 1999, Paris, Editions de la Maison des sciences de l'homme, 2001, 502p.

[Greniewski, H., 1960, 1965], Cybernétique sans mathématiques, Varsovie, PWN - Editions scientifiques de Pologne, 1960 ; traduction : Paris, Gauthier-Villars, 1965, 131p.

[Grimm, V., 1999], "Ten years of individual-based modeling in ecology: what have we learned and what could we learn in the future ? ", Ecological Modelling, 115 (1999), pp. 129-148.

[Grimoult, C., 2001], L'évolution biologique en France – Une révolution scientifique, politique et culturelle, Genève-Paris, Droz, 2001, 298p.

[Griset, P., 1991], Les révolutions de la communication – 19ème – 20ème siècle, Paris, Hachette Supérieur, 1991, 255p.

[Grodins, F. S., 1965], "Computer simulation of cybernetic systems", in [Stacy, R. W. and Waxman, B., 1965, 1969], Tome I, pp. 135-164.

[Gros, F., 1990, 1992], L'ingénierie du vivant, Paris Odile Jacob, 1990 ; réédition : Seuil, coll. Points, 1992, 247p.

[Gros, F., Jacob, F. et Royer, P., 1979], Sciences de la vie et société, Rapport présenté à M. le Président de la République en 1978, Paris, La Documentation Française - Seuil, 1979, 288p.

[Gualandi, A., 1998], Le problème de la vérité scientifique dans la philosophie française contemporaine, Paris, L'Harmattan, 1998, 256p.

[Guédès, M., 1969], « La théorie de la métamorphose en morphologie végétale : des origines à Goethe et Batsch », Revue d'histoire des sciences appliquées, 22, pp. 323-363.

[Guédès, M., 1972], « La théorie de la métamorphose en morphologie végétale : A. P. de Candolle et P. J. F. Turpin », Revue d'histoire des sciences appliquées, 25, pp. 253-270.

[Guédès, M., 1973], « La théorie de la métamorphose en morphologie végétale. La métamorphose et l'idée d'évolution chez Alexandre Braun », Episteme, 7, pp. 32-51.

[Guilbaud, G. TH., Colasse, B. et Pavé, F., 2002], « La mathématique et le social – Entretien avec Georges Th. Guilbaud mené par Bernard Colasse et Francis Pavé », Gérer et Comprendre, mars 2002, n°67, pp. 67-74.

[Guillaume, M., 1971], Modèles économiques, Paris, PUF, 1971, 313p.

[Guillevic, P., 1999], Modélisation des bilans radiatif et énergétique des couverts végétaux, thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, spécialité « télédétection de la biosphère continentale – modélisation », soutenue le 13 décembre 1999, http://gershwin.ens.fr/great/these_Guillevic_1999.pdf, 186p.

[Guitton, H., 1987], « La modélisation en économie », in Biologie et Economie, éd. par J. Demongeot et P. Malgrange, Dijon, Librairie de l'Université de Bourgogne, 1987, pp. 23-28.

[Gusdorf, G., 1960, 1974], Introduction aux sciences humaines, Strasbourg, Association des publications près les Universités de Strasbourg, 1960 ; nouvelle édition : Paris, Ophrys, 1974, 522p.

[Guyon, E., 1996, 1997], « Modélisation et expérimentation », in [Cohen-Tannoudji, 1996, 1997], pp. 101-126.

[Habermas, J., 1968, 1976, 1979], Erkenntnis und Interesse, Frankfurt am Main, Suhrkamp Verlag, 1968 ; traduction : Connaissance et intérêt, Paris, Gallimard, 1976, coll. Tel, 1979, 386p.

[Habermas, J., 1999a, 2000], « Hermeneutische und analytische Philosophie. Zwei komplementäre Spielarten der linguistischen Wende », in Wahrheit und Rechtfertigung, Frankfurt am Main, Suhrkamp Verlag, 1999 ; première traduction : «Philosophie herméneutique et philosophie analytique – Deux variantes complémentaires du tournant linguistique », Un siècle de philosophie 1900-200, Paris, Gallimard, Folio-Essais Inédit, 2000, pp. 177-230.

[Habermas, J., 1999b, 2001], Wahrheit und Rechtfertigung, Frankfurt am Main, Suhrkamp Verlag, 1999 ; traduction complète (dont l'article précédent) : Vérité et justification, Paris, Gallimard, NRF-essais, 2001, 348p.

[Hacking, I, 1990], The Taming Of Chance, Cambridge, Cambridge University Press, Ideas in Context, 1990, 266p.

[Hacking, I., 1983, 1989], Representing and Intervening, Cambridge University Press, 1983 ; traduction : Concevoir et expérimenter, Paris, Bourgois, 1989, 459p.

[Hacking, I., 1999, 2001], The Social Construction of What ?, Harvard University Press, 1999 ; traduction : Entre science et réalité – La construction sociale de quoi ?, Paris, La Découverte, 2001, 299p.

[Haggett, P., 1965, 1968, 1973], Locational Analysis in Human Geography, 1ère édition : Edward Arnold Ltd, 1965 ; 4ème édition :1968 ; traduction de la 4ème édition par Hubert Fréchou : L'analyse spatiale en géographie humaine, 1973, Paris, Armand Colin, 390p.

[Haken, H., 1977, 1978], Synergetics : An introduction, Berlin, Springer Verlag, 1977 : 1ère édition ; 1978 : 2ème édition augmentée, 355p.

[Haldane, J. B. S., 1938, 1946], La Philosophie marxiste et les Sciences, traduction de conférences données en 1938 à l'Université de Birmingham, Paris, Editions Sociales, 1946, 245p.

[Hallé, F. et Varenne, F., 2004], Entretien transcrit, 15p.

[Hallé, F., 1979], « Modèles architecturaux chez les arbres tropicaux », in [Delattre, P. et Thellier, M., 1979], pp. 537-550.

[Hallé, F., 1999], Eloge de la plante. Pour une nouvelle biologie, Paris, Seuil, 1999, 341p.

[Hallé, F., Oldeman, R. A. A., Tomlinson P. B., 1978], Tropical trees and forests. An architectural analysis, New York, Heidelberg, Berlin, Springer Verlag, 1978, 441p.

[Hallé, F., Oldeman, R. A. A., 1970], Essai sur l'architecture et la dynamique de croissance des arbres tropicaux, Paris, Masson, 1970, 178p.

[Harman, P. M., 1998], The Natural Philosophy of James Clerk Maxwell, Cambridge (UK), Cambridge University Press, 1998, 232p.

[Harris, T. E., 1963, 1969], The theory of branching processes, vol. 119 de la série "Die Grundlehren der mathematischen Wissenschaften", Springer-Verlag, Berlin, 1963; traduction : Les processus de ramification, Paris, Dunod, 1969, 275p.

[Hartmann, S., 1995], "Simulation", in Enzyklopädie Philosophie und Wissenschaftstheorie, vol. 3, Verlag Metzler, Stuttgart, pp. 807-809.

[Hartmann, S., 1996], "The World as a Process: Simulation in the Natural and Social Sciences", in [Hegselmann, R., Mueller, U. et Troitsch, K., 1996], pp. 77-100.

[Hartmann, S., 1999], "Models and stories in hadron physics", in [Morgan, M.S. et Morrison, M., 1999], pp. 326-346.

[Hatta, H., Honda, H. et Fisher, J. B., 1999], « Branching Principles Governing the Architecture of *Cornus Kousa* (Cornaceae)", Annals of Botany, 1999, vol. 84, pp. 183-199.

[Hayek (von), F., 1952], Scientism and the study of society, Glencoe, Illinois, The Free Press, 1952 ; traduction : Scientisme et sciences sociales, Paris, Plon, 1953 ; édition de poche : Paris, Agora, 1986, 186p.

[Hegel, G.W.F., 1807, 1939], La phénoménologie de l'Esprit, Tome I, trad. de Jean Hyppolite, Paris, Aubier, 1939, 358p.

[Hegselmann, R., Mueller, U. et Troitsch, K., 1996], Modelling and Simulation in the Social Sciences from the Philosophy of Science Point of View, ed. by R. Hegselmann *et al.*, Dordrecht, Boston, London, Kluwer Academic Publisher, 1996, 318p.

[Heinmets, F., 1969], Concepts and Models of Biomathematics : Simulation Techniques and Methods, vol. 1, ed. by F. Heinmets, New York, Marcel Dekker, Inc., 1969, 287p.

[Hempel, C., 1966, 1972], Philosophy of Natural Sciences, Englewood Cliffs, N. J., Prentice Hall, 1966 ; traduction : Eléments d'épistémologie, Paris, Armand Colin, 1972, 184p.

[Herman G. T. et Schiff, G. L., 1975], "Simulation of Multi-gradient Models of Organisms in the Context of L-Systems", Journal of Theoretical Biology, 54, 1975, pp. 35-46.

[Herman, G. T., 2003], "Gabor T. Herman", curriculum vitae et publications jusqu'en 2003, accessible à l'adresse http://www.cs.gc.cuny.edu/~gherman/.

[Hesketh, J. D. et Jones, J. W., 1976], "Some Comments on Computer Simulators for Plant Growth – 1975", Ecological Modelling, 2 (1976), pp. 235-247.

[Hesse, M. B., 1966], Models and Analogies in Science, Notre Dame, University of Notre Dame Press, 1966 ; 2nd printing : 1970, 184p.

[Heudin, J. C., 1994], La vie artificielle, Paris, Hermès, 1994, 267p.

[Hicks, D., 1995-2002], "The museum of HP calculators", site Internet conçu par David Hicks et présentant des fiches techniques sur toutes les machines HP, accessible à l'adresse www.hpmuseum.org.

[Hill, D. R. C., 1996], Object Oriented Analysis and Simulation, Addison Wesley, 1996.

[Hill, D. R. C., 2000], Contribution à la modélisation de systèmes complexes – Application à la simulation d'écosystèmes, Mémoire d'habilitation à diriger des recherches de l'Université Blaise Pascal, spécialité informatique, Clermont-Ferrand, 2000, 123p.

[Hill, D.R.C., 1995], "Verification and Validation of Ecosystem Simulation Models", in Summer Simulation Conference, July 24-26, Ottawa, Canada, pp. 176-182.

[Hintikka, J., 1980, 1996], La philosophie des mathématiques chez Kant, 1ère édition en anglais (sans lieu) : 1980 ; traduction : Paris, PUF, 1996, 311p.

[Hobsbawm, E., 1994, 1999, 2003], Ages of Extremes : The Short Twentieth Century, 1914-1991, London, 1994 ; traduction : L'Age des extrêmes. Histoire du court vingtième siècle - 1914-1991, Bruxelles, 1999 et 2003, 810p.

[Hodges, A., 1983, 1988], Alan Turing : the enigma of intelligence, sans lieu, Burnett Books Limited in association with the Hutchinson Publishing Group, 1983 ; traduction abrégée : Alan Turing ou l'énigme de l'intelligence, Paris, Payot, 1988, 439p.

[Hofstadter, D., 1979], Gödel, Escher, Bach : an Eternal Golden Braid ; traduction : Gödel, Escher, Bach : les Brins d'une Guirlande Eternelle, Paris, InterEditions/Masson, 1985. Cf. particulièrement chapitre XVII.

[Holland, J. H., 1962], "Outline for a Logical Theory of Adaptive systems", Journal of the ACM, vol. 9, n°3, July 1962, pp. 297-314.

[Holland, J. H., 2001], "Genetic algorithms", texte d'une conférence prononcée à l'Université de Columbia (USA) en 2001, accessible à l'adresse : http://www.arch.columbia.edu/DDL/cad/A4513/S2001/r7/

[Hollier, D., 1973], Panorama des sciences humaines, collectif dirigé par Denis Hollier, Paris, NRF, coll. Le point du jour, 1973, 667p.

[Hollingdale, S. H., 1967], Digital Simulation in Operational Research, a conference under the aegis of the Scientific Affaire Division of N.A.T.O., held in Hamburg, 6-10th, September 1965, The English University Pres Ltd, London, 392p.

[Holton, G., 1973, 1978, 1981], The Scientific Imagination, (sans lieu), 1981, réunissant des travaux parus auparavant dans Thematic Origins of Scientific Thought : Kepler to Einstein, Cambridge (Mass.), Harvard University Press, 1973 et The Scientific Imagination : Case Studies, Cambridge University Press, 1978 ; traduction : L'imagination scientifique, Paris, NRF-Gallimard, 1981, 486p.

[Honda, H. et Eguchi, G., 1980], "How Much Does the Cell Boundary Contract in a Monolayered Cell Sheet ?", Journal of Theoretical Biology, 1980, vol. 84, pp. 575-588.

[Honda, H. et Fisher, J. B., 1978], "Tree Branch Angle : Maximizing Effective Leaf Area", Science, 24 February 1978, vol. 199, p. 888-890.

[Honda, H. et Fisher, J. B., 1979], "Ratio of tree branch lengths : The equitable distribution of leaf clusters on branches", Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA, vol. 76, n°8, August 1979, Botany, pp. 3875-3879.

[Honda, H., 1971], "Description of the form of trees by the parameters of the tree-like body : effects of the branching angle and the branch length on the shape of the tree-like body", Journal of Theoretical Biology, 31, 1971, pp. 331-338.

[Honda, H., 1973], “Pattern Formation of the Coenobial Algae *Pediastrum biwae* Negoro”, Journal of Theoretical Biology, 1973, vol. 42, pp. 461-481.

[Honda, H., 1978], “Description of Cellular Patterns by Dirichlet Domains : The Two-Dimensional Case”, Journal of Theoretical Biology, 1978, vol. 72, pp. 523-543.

[Honda, H., Hatta, H. et Fisher, J. B., 1997], “Branch Geometry in *Cornus Kousa* (Cornaceae) : Computer Simulations”, American Journal of Botany, 1997, 84 (6), pp. 745-755.

[Honda, H., Tanemura, M. et Nagai, T., 2003], “A Three-Dimensional Vertex Dynamics Cell Model of Space-Filling Polyhedra Simulating Cell Behavior in a Cell Aggregate”, Journal of Theoretical Biology, fin 2003, à paraître.

[Honda, H., Tomlinson, P. B. et Fisher, J. B., 1981], “Computer Simulation of Branch Interaction and Regulation by Unequal Flow Rates in Botanical Trees”, American Journal of Botany, 1981, 68 (4), pp. 569-585.

[Honda, H., Tomlinson, P. B. et Fisher, J. B., 1982], “Two Geometrical Models of Branching of Botanical Trees”, Annals of Botany, 1982, vol. 49, pp. 1-11.

[Horder, T. J., 2001], “The organizer concept and modern embryology : Anglo-American perspectives”, Int. J. Dev. Biol., 2001, vol. 45, pp. 97-132.

[Hottois, G., 1984], Le signe et la technique, Paris, Aubier, 1984, 222p.

[Houllier, F. et Varenne, F., 2000], Entretien transcrit, 32p.

[Houllier, F., 1987], « Modélisation de la dynamique des peuplements forestiers. Relations entre objectifs, structures, données et méthodes », in Biologie et Economie, éd. par J. Demongeot et P. Malgrange, Dijon, Librairie de l’Université de Bourgogne, 1987, pp. 271-293.

[Houllier, F., 1995], « Dynamique des peuplements de forêt dense humide : dialogue entre écologues, expérimentateurs et modélisateurs », Revue d’Ecologie, 50.3, 1995, pp. 303-311.

[Houllier, F., Bouchon, J., Birot, Y., 1991], « Modélisation de la dynamique des peuplements forestiers : état et perspectives », Revue Forestière Française, vol. 43 (2), pp. 87-108.

[Houllier, F., Colin, F., Leban, J. M., 1993], “Modélisation de la croissance et de la qualité du bois de l’épicéa commun (*Picea abies* Karst) : implications pour l’observation et l’expérimentation, applications à la sylviculture et aux inventaires », in Les modèles de croissance forestière et leurs utilisations (Québec, 18-19 novembre 1993), Chhun-Huor Ung (Ed.), pp. 69-82.

[Houllier, F., Leban, J. M., Colin, F., 1995], “Linking growth modelling to timber quality assessment for Norway spruce”, For. Ecol. Manage., 74, pp. 91-102.

[Houllier, F., Leban, J. M., Colin, F., Nepveu, G., 1991], « Modélisation de la croissance des arbres et des peuplements et de la qualité des bois », 10ème Congrès Forestier Mondial, Paris, 17-26 sept. 1991, 8 p.

[Hume, D., 1748, 1983], Philosophical Essays Concerning Human Understanding, London, 1748 ; traduction : Enquête sur l’entendement humain, Paris, Garnier-Flammarion, 1983, 252p.

[Humphreys, P., 1990] “Computer Simulations”, PSA (Philosophy of Science Association), 1990, vol. 2, pp. 497-506.

[Humphreys, P., 2002], “Computational Models”, in Philosophy of Science, 69 (September 2002), pp. S1-S11.

[Husserl, E., 1954, 1976], La crise des sciences européennes et la phénoménologie transcendantale, Martinus Nijhoff, La Haye, 1954 ; traduction : Paris, TEL/Gallimard, 1976, 589p.

[Hutchins, J., 1997a, 2003], “Looking back to 1952 : the first MT conference”, article présenté au colloque Theoretical and Methodological Issues in Machine Translation, Sante Fe, New Mexico, July 1997, 13 pages ; accessible en 2003 à l’adresse : http://ourworld.compuserve.com/homepages/WJHutchins/TMI-97.htm.

[Hutchins, J., 1997b, 2003], “From first conceptions to first demonstrations : the nascent years of machine translation, 1947-1954 – A chronology”, Machine Translation, vol. 12, n°3, 1997, pp. 195-252 ; accessible en 2003 à l’adresse http://ourworld.compuserve.com/homepages/WJHutchins/MTJ-1997.pdf.

[Hyppolite, J., 1953], Logique et existence, Paris, PUF/Epiméthée, 1953, 249p.

[Idatte, P., 1969], Clefs pour la cybernétique, Paris, Seghers, 1969, 194p.

[INRA, architecte, 1998], page internet de l’INRA « les architectes du végétal », « nouvelles brèves » accessible début 2000 à l’adresse http://www.inra.fr/PRESSE/MARS98/nb2.htm.

[INRA-Grignon, 1997], Modélisation architecturale, éd. par Andrieu, B., Actes du séminaire des 10-12 mars 1997, département de Bioclimatologie, INRA-Grignon, document interne.

[Israel, G., 1996], La mathématisation du réel, Paris, Seuil, 1996, 368p.

[Israel, G., 2000], Le jardin au noyer, Paris, Seuil, 2000, 280p.

[Israel, G., 2002], « John von Neumann, joueur stratégique », La Recherche, Hors-Série, n°7, avril-juin 2002, pp. 44-45.

[Jacob, F., 1970, 1976], La logique du vivant, Paris, Gallimard, 1970 ; édition Tel-Gallimard, 1976, 354p.

[Jacob, P., 1980], L’empirisme logique, Paris, Les éditions de minuit, 1980, 306p.

[Jacques, F., 1989, 1995], « La pragmatique », article de l’Encyclopaedia Universalis, version de 1989 sur CD-ROM : 1995.

[Jaeger, M. et Reffye (de), Ph., 1992], “Basic concepts of computer simulation of plant growth”, J. Biosci. 17, pp. 275-291.

[Jaeger, M., 1987], Représentation et simulation de croissance des végétaux. Nouvelle thèse n°1071 (spécialité informatique), Université Louis Pasteur, Strasbourg, France, 156p.

[Jagoret, P. et Descroix, F., 2002], « Evolution de la culture de *Coffea canephora* en Afrique et problématique de développement », Plantations, recherche, développement, mai 2002, pp. 45-52.

[Jakobson, R. et Halle, M., 1956, 1963], "Phonology and Phonetics", première partie des Fundamentals of Language, La Haye, 1956 ; modifié et traduit : « Phonologie et phonétique », in [Jakobson, R., 1963], pp. 103-149.

[Jakobson, R., 1963], Essais de linguistique générale, Paris, Editions de Minuit, 1963, 260p.

[Jallais, S., 2001], Mathématiques des modèles dynamiques pour économistes, Paris, La Découverte & Syros, 2001, 126p.

[James, W., 1907, 1968], Le pragmatisme, Harvard, 1907 ; traduction : Paris, Flammarion, 1968, 247p.

[Jami, I., 2002], « Le parfum militaire du code génétique », La Recherche, Hors-Série, n°7, avril-juin 2002, pp. 98-100.

[Janay, N., 1992], Modélisation et synthèse d'images d'arbres et de bassins fluviaux associant méthodes combinatoires et plongement automatique d'arbres et cartes planaires, Université de Franche-Comté, spécialité : automatique et informatique, http://raphaello.univ-fcomte.fr/These/Default.htm, France.

[Jean, R. V. et Barabe, D., 2001], "Application of Two Mathematical Models to the Araceae, a Family of Plants with Enigmatic Phyllotaxis", Annals of Botany, 2001, vol. 88, pp. 173-186.

[Jean, R. V., 1978], Phytomathématique, Montréal, 1978, 271p.

[Jean, R. V., 1983], Croissance végétale et morphogenèse, Paris, Québec, Masson, Presses de l'Université du Québec, 1983, 323p.

[Jean, R. V., 1987], Une approche mathématique de la biologie, ouvrage collectif dirigé par Roger V. Jean, Chicoutimi, Gaëtan Morin Editeur, 1987.

[Jean, R. V., 1994, 1995], Phyllotaxis – A Systemic Study in Plant Morphogenesis, Cambridge University Press, 1994 ; reprinted : 1995, 386p.

[Jeannerod, M., 2002a], La nature de l'esprit, Paris, Odile Jacob, 2002, 257p.

[Jeannerod, M., 2002b], Le cerveau intime, Paris, Odile Jacob, 2002, 219p.

[Jenny, L., 2002], La fin de l'intériorité, Paris, PUF, coll. Perspectives littéraires, 2002, 164p.

[Jensen, H.J., 1998], Self-Organized Criticality. Emergent Complex Behavior in Physical and Biological Systems, Cambridge, Cambridge University Press, 1998, 153p.

[Jensen, P. et Blase, X., 2002], « Les matériaux virtuels », La Recherche, n°352, avril 2002, pp. 40-44.

[Jensen, P., 2001], Entrer en matière, Paris, Seuil, coll. Science Ouverte, 2001, 264p.

[Johnson, S., 2002], "Zellig S. Harris", sité dédié à la mémoire du linguiste Zelig S. Harris, maintenu par Stephen Johnson, 2002, accessible à l'adresse http://www.dmi.columbia.edu/zellig/.

[Johnson, J. H. et Loomes, M. J., 1991], The Mathematical Revolution Inspired by Computing, Proc. of a Conference organized by The Institute of Mathematics and its Applications and held at Brighton Polytechnic, in April 1989, Oxford, Clarendon Press, 1991.

[Johnson, S., 2001], Emergence, London, Penguin Books, 2001, 288p.

[Jolicœur, P., 1991], Introduction à la biométrie, Montréal-Paris, Décarie-Masson, 1991, 300p.

[Jolivalt, B., 1995], La simulation et ses techniques, Paris, PUF, QSJ, 1995, 127p.

[Jorgensen, S. E., 1979], State-of-the-Art in Ecological Modeling, Proc. of the Conference on Ecological Modeling, Copenhagen, Denmark, 28 august – 2 september 1978, Oxford, New-York, ed. By S. E. Jorgensen (International Society for Ecological Modeling), Pergamon Press, 1979, 891p.

[Jorgensen, S. E., 1983], Application of Ecological Modelling in Environmental Management, Part A, Amsterdam, Elsevier Scientific Publishing Company, 1983, 735p.

[Jorland, G., 1981], La science dans la philosophie – Les recherches épsitémologiques d'Alexandre Koyré, Paris, NRF-Gallimard, 1981, 374p.

[Journal of Theoretical Biology, (volume), (année)], paraissant depuis 1961.

[Joutard, P., 1979], « Historiens, à vos micros ! Le document oral, une nouvelle source pour l'histoire », L'Histoire, n°12, mai 1979, pp. 106-112.

[Joutard, P., 1983], Ces voix qui nous viennent du passé, Paris, Hachette, 1983, 268p.

[Juglas, J. J., 1957], « Préface », préface au premier numéro de la revue du service « Café-Cacao-Thé » de l'ORSTOM, Café, Cacao, Thé, vol. 1, n°1, janvier-avril 1957, pp. 3-4.

[Kaandorp, J. A., 1994], Fractal Modeling Growth and Form in Biology, New York, Springer Verlag, 1994.

[Kahn, H. et Wiener, E.J., 1967, 1972], The Year 2000, Hudson Institute Inc., 1967 ; traduction : L'an 2000 – La bible des trente prochaines années, Verviers (Belgique), Gérard et Cie, Marabout Université, 1972, 519p.

[Kambouchner, D., 1995], « La culture », in Notions de philosophie, Tome III, Paris, Folio, coll. Essais, 1995, pp. 445-568.

[Kang, M. Z., Reffye (de), Ph., Barczi, J. F. et Hu, B. G., 2003], "Fast Algorithm for Stochastic Tree Computation", The 11th International Conference in Central Europe on Computer Graphics - Visualization and Computer Vision 2003, in cooperation with EUROGRAPHICS, Journal of WSCG (Winter School of Computer Graphics), vol. 11, n°1, 8p.

[Kant, E., 1775-1781, 1993], Leçons de métaphysique, cours professés par Kant entre 1775 et 1781 : Paris, Librairie Générale Française, Livre de Poche, 1993, 474p.

[Kant, E., 1781, 1787, 1944, 1984], Critique de la Raison Pure, traduction de 1944 de A. Tremsaygues et B. Pacaud, Paris, PUF-Quadrige, 1984, 584p.

[Kant, E., 1790, 1989], Critique de la Faculté de Juger, 1790, traduction d'Alexis Philonenko : Paris, Vrin, 1989, 308p.

[Kaplan, F., 1995], Le paradoxe de la vie, Paris, La Découverte, 1995, 261p.

[Kasner, E., 1970], Mathematics and the Imagination, New York, Simon and Schuster, sans date ; traduction : Les mathématiques et l'imagination, Paris, Payot, coll. Bibliothèque scientifique, 1970, 252p.

[Kaufman, A., Faure, R. et Le Garff, A., 1960, 1976], Les jeux d'entreprises, 1ère édition : 1960, 4ème édition corrigée : 1976, Paris, PUF, QSJ, 128p.

[Kaufman, S., 1995], At Home in the Universe. The Search for the Laws of Self-Organization and Complexity, Oxford, Oxford University Press, 1995, 321p.

[Keilling, J., 1997], « L'agriculture biologique : objectifs, techniques et résultats », Agence du Développement Durable Appliqué (ADDA), Paris, 1997, 21p., http://www.abcdpresse.fr/pdf/ADDA%20-Testament_de_Keilling.pdf.

[Keller, E. F., 1995], Refiguring life. Metaphors of Twentieth-Century Biology, Columbia Univ. Press., traduction française : Le rôle des métaphores dans les progrès de la biologie, Paris, Institut Synthélabo, 1999, 178p.

[Keller, E. F., 2000, 2003], The Century of the Gene, Harvard University Press, 2000 ; traduction : Le siècle du gène, Paris, Gallimard, 2003, 173p.

[Keller, E. F., 2002, 2003], Making Sense of Life. Explaining Biological Development with Models, Metaphors and Machines, Cambridge Mass., Harvard University Press, 2002, 2nde édition : 2003, 388p.

[Keller, E. F., 2002], "Models, Simulation and 'Computer Experiments' ", in The Philosophy of Scientific Experimentation, ed. by Hans Radder, University of Pittsburgh Press, 2002, 16 pages.

[Keller, E. F., 2004], « Génome, postgénome : quel avenir pour la biologie ? », La Recherche, n° 376, juin 2004, pp. 30-37.

[Keller, O., 1998], « Questions ethnographiques et mathématiques de la préhistoire », Revue de synthèse, Tome 119, 4ème série, n°4, octobre-décembre 1998, pp. 545-573.

[Kepper (de), P., Dulos, E., Wit (de), A., Dewel, G. et Borckmans, P., 1998], « Tâches, rayures et labyrinthes », [La Recherche, 1998, 305], pp. 84-89.

[Kershaw, I., 1985, 1993, 1997], The Nazi Dictatorship. Problems and Perspectives of Interpretation, Edward Arnold, 1985, 1993 (dernière édition anglaise) ; traduction : Qu'est-ce que le nazisme ? Problèmes et perspectives d'interprétation, Paris, Gallimard, 1992, coll. Folio-histoire, 1997 (pour l'édition en français augmentée de deux chapitres), 538p.

[Kingsland, S. E., 1985, 1995], Modeling Nature – Episodes in the History of Population Ecology, Chicago and London, The University of Chicago Press, 1985 ; seconde édition avec une nouvelle postface : même éditeur, 1995, 306p.

[Kitcher, P., 1999], "The Hegemony of Molecular Biology", Biology and Philosophy, vol. 14, 1999, pp. 195-210.

[Klein, E., 2000], L'unité de la physique, Paris, PUF, Science histoire et société, 2000, 336p.

[Köhler, P., 1913], Der Begriff der Repräsentation bei Leibniz – Ein Beitrag zur Entstehungsgeschichte seines Systems, Bern, Verlag von A. Francke, 1913, 162p.

[Kojève, A., 1947, 1990], Introduction à une lecture de Hegel, Paris, 1947 ; réimpression : Tel/Gallimard, 1990, 599p.

[Kolakowski, L., 1966, 1976], Filozofia pozytywistyczna, Stuttgart, Geisenheyner & Crone, 1966 ; traduction : La philosophie positiviste, Paris, Denoël/Gonthier, coll. Médiations, 1976, 251p.

[Konopka, A. K., 2003], "Selected dreams and nightmares about computational biology", Computational Biology and Chemistry, 2003, vol. 27, pp. 91-92.

[Kostitzin, V. A., 1937], Biologie Mathématique, Paris, Armand Colin, 1937, préface de Vito Volterra.

[Koyré, A., 1961], Etudes d'histoire de la pensée philosophique, Paris, Armand Colin, 1961, 329p.

[Kuhn, T., 1962, 1970, 1983], The Structure of Scientific Revolutions, Chicago, The University of Chicago Press, 1962 ; seconde édition augmentée : 1970 ; traduction : La structure des révolutions scientifiques, Paris, Flammarion, coll. Champs, 1983, 285p.

[Kuntzman, J., 1967], Procédures ALGOL en analyse numérique, ouvrage collectif édité par J. Kuntzman, Paris, CNRS, 1967, 324p.

[Kurt, W., 1994], "Morphological models of plant growth : possibilities and ecological relevance", Ecological modelling, 75/76, pp. 299-308.

[Kurth, W. et Sloboda, B., 2001], "Sensitive Growth Grammars Specifying Models of Forest Structure, Competition nd Plant-Herbivore Interaction", Proc. of the IUFRO 4. 11 Congress "Forest Biometry, Modelling and Information Science", Greenwich (UK), June 25-29, 2001, 15 pages, accessible sur htttp://www.uni-forst.gwdg.de/~wkurth/

[Kurth, W., 1995], “Stochastic sensitive growth grammars : A basis for morphological models of tree growth”, Colloque “L’arbre – Biologie et Développement”, Montpellier, 11-16 septembre 1995, 15 pages, accessible sur htttp://www.uni-forst.gwdg.de/~wkurth/

[Kurth, W., 1996], “Elemente einer Regelsprache zur dreidimensionalen Modellierung des Triebwachstums von Laubbäumen“, in Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten – Sektion Forstliche Biometrie und Informatik, G. Hempel (Hg), Tharandt/Grillenburg, 8. Tagung, 25-28 September 1995, Ljubljana, Biotechnische Fakultät, 1996, pp. 174-187, accessible sur htttp://www.uni-forst.gwdg.de/~wkurth/

[Kurth, W., 2002], “Spatial structure, sensitivity and comunication in rule-based models”, in Scales, Hierarchies and Emergent Properties in Ecological Models, Franz Hölker (ed.), Frankfurt am Main, Peter Lang, 2002, pp. 95-104.

[L’Héritier, P., 1984], La grande aventure de la génétique, Paris, Flammarion, 1984, 385p.

[La Recherche, 1998, 305], La Recherche, n°305, janvier 1998, numéro spécial sur « l’origine des formes ».

[La recherche, mai, 1991], La science du désordre, numéro spécial de La recherche, n°232, mai 1991.

[Labarrière, P. J., 1968, 1985], Structures et mouvement dialectique dans la Phénoménologie de l’Esprit, Paris, Aubier, 1968 ; nouvelle édition : Paris, Aubier, 1985, 314p.

[Labarrière, P. J., 1979], Introduction à une lecture de la Phénoménologie de l’Esprit, Paris, Aubier, 1979, 287p.

[Laborit, H., 1968], Biologie et structure, Paris, Gallimard, 1968.

[Laborit, H., 1971, 1994], L’homme et la ville, Paris, Flammarion, 1971; Champs - Flammarion, 1994, 217p.

[Laborit, H., 1974, 1995], La nouvelle grille, Paris, Robert Laffont, 1974 ; Gallimard, 343p.

[Laborit, H., 1976, 1996], Eloge de la fuite, Paris, Robert Laffont, 1976 ; Gallimard, 1996, 187p.

[Lacalli, T. C. et Harrison, 1979], “Turing’s Conditions and the Analysis of Morphogenetic Models”, Journal of Theoretical Biology, 1979, vol. 76, pp. 419-436.

[Lacan, J., 1948, 1970, 1999], « L’agressivité en psychanalyse », conférence prononcée en 1948, publiée in Ecrits, Tome I, Paris, Seuil/Poche, 1970 ; réédition : 1999, pp. 100-123.

[Lachnitt, J., 1963, 1978], La mécanique des fluides, Paris, PUF, QSJ, 1963 ; 3ème édition : 1978, 128p.

[Ladrière, J., 1957, 1992], Les limitations internes des formalismes, Louvain, Nauwelaerts Editeur et Paris, Gauthier-Villars Editeur, 1957 ; réimpression : Sceaux, Jacques Gabay, fac-similé, 714p.

[Lagarde (de), J., 1983], Initiation à l’analyse des données, 3ème édition revue : 1995, Paris, Dunod, 163p.

[Lakatos, I., 1978, 1986, 1994], The Methodology of scientific research programs (papiers posthumes de 1978), Cambridge, Cambridge University Press, 1986, trad. : Histoire et méthodologie des sciences (programmes de recherche et reconstruction rationnelle), sous la dir. de Luce Giard, PUF, Bibliothèque d’histoire des sciences, 1994, 268p.

[Lambert, D., 1999], « L’incroyable efficacité des mathématiques », La Recherche, n°316, janvier 1999, pp. 48-55.

[Landais, E. et Bonnemaire, J., 1996], « La zootechnie, art ou science ? Entre nature et société, l’histoire exemplaire d’une discipline finalisée », Courrier de l’environnement, n°27, août 1996 ; accessible à l’adresse http://www.inra.fr/dpenv/landc27.htm, 21p.

[Langlois, A. et Phipps, M., 1997], Automates cellulaires – application à la simulation urbaine, Paris, Hermes, 1997, 197p.

[Langton, Ch. G., 1987], Artificial Life, Langton ed., Proceedings of an interdisciplinary workshop on the synthesis and simulation of living systems, sept. 1987, Los Alamos, New Mexico.

[Laplace (de), P. S., 1814, 1986], Essai philosophique sur les probabilités, Paris, chez Mme Veuve Courcier, 1814 ; réédition : Paris, 1986, Christian Bourgois, 314p.

[Largeault, J., 1989, 1995], « Description et explication », article de l’Encyclopadia Universalis, édition 1989, version CD-ROM, 1995, 13p.

[Larrère, C. et Larrère, R., 1997], Du bon usage de la nature – Pour une philosophie de l’environnement, Paris, Aubier, 1997, 355p.

[Lasker, G.E., 1980a], Applied Systems and Cybernetics – Vol. IV : Systems Research in Health Care, Biocybernetics and Ecology, Proc. of the Int. Congress on Applied Systems Research and Cybernetics, December 12-16, 1980, Acapulco, Mexico, ed. by G.E. Lasker, New York, Pergamon Press, 1980, xxx + 414p.

[Lasker, G.E., 1980b], Applied Systems and Cybernetics – Vol. V : Systems Approaches in Computer Science and Mathematics, Proc. of the Int. Congress on Applied Systems Research and Cybernetics, December 12-16, 1980, Acapulco, Mexico, ed. by G.E. Lasker, New York, Pergamon Press, 1980, xxxiii + 653p.

[Lassègue, J., 1998a], « Turing, l’ordinateur et la morphogenèse », La Recherche, n°305, janvier 1998, pp. 76-77.

[Lassègue, J., 1998b], Turing, Paris, Les Belles Lettres, collection « figures du savoir », 1998, 210p.

[Laszlo, P., 1999], La découverte scientifique, Paris, PUF, QSJ, 128p.

[Laszlo, P., 2002], L’architecture du vivant, Paris, Flammarion, 2002, 342p.

[Latil (de), P., 1953], La pensée artificielle – Introduction à la cybernétique, Paris, Gallimard, coll. « L’avenir de la science », 1953, 332p.

[Latour, B. et Woolgar, S., 1979, 1988], Laboratory Life. The Construction of Scientific Facts, 1979, Sage Publications, Inc.; traduction : La vie de laboratoire - La production des faits scientifiques, Paris, La Découverte, 1988, 300p.

[Latour, B., 1989, 1995], La science en action, Paris, La Découverte, 1989 ; nouvelle édition révisée par l'auteur et parue chez Gallimard, 1995, 663p.

[Latour, B., 1989, 1997], « Pasteur et Pouchet : hétérogenèse de l'histoire des sciences », in Eléments d'histoire des sciences, dir. par Michel Serres, Paris, Bordas, 1989 ; réimpression : Larousse/Bordas, 1997, pp. 669-663.

[Latour, B., 1991, 1997], Nous n'avons jamais été modernes, Paris, La Découverte, 1991 ; réimpression : La Découverte/Poche, 1997, 209p.

[Laugier, S., 2001], Carnap et la construction logique du monde, collectif, S. Laugier éd., Paris, Vrin, 2001, 322p.

[Laurent, A. G., 1950, 1968], La méthode statistique dans l'industrie, Paris, QSJ, 1ère édition : 1950 ; 4ème édition revue : 1968, 128p.

[Lautman, A., 1936], « Le congrès international de philosophie des sciences (du 15 au 23 septembre 1935) », Revue de métaphysique et de morale, vol. 43, n°1, 1936, pp. 113-129.

[Lautman, A., 1977], Essai sur l'unité des mathématiques et divers écrits, recueil posthume d'écrits divers, Paris, UGE 10/18, 1977, 319p.

[Lavendhomme, R., 2001], Lieux du sujet – Psychanalyse et mathématique, Paris, Seuil, Champ Freudien, 2001, 364p.

[Le Bras, H., 2000], Essai de géométrie sociale, Paris, Odile Jacob, 2000, 301p.

[Le Douarin, N., 2000], Des chimères, des clones et des gènes, Paris, Editions Odile Jacob, 2000, 480p.

[Le Goff, J., 1977, 1984], La civilisation de l'occident médiéval, Paris, Arthaud, 1977 ; réédition : Paris, 1984, Arthaud, 510p.

[Le Guyader, H., 1985], « Taxinomie et biologie théorique », in [Solignac-1985, 1987], pp. 167-175.

[Le Hir, P., 2003], « Modéliser le vent pour mieux lutter contre les feux de forêt », Le Monde, 11 juin 2003, p. 24.

[Le Lionnais, F., 1959 ?], La méthode dans les sciences modernes, n° hors-série de la revue « Travail et Méthodes » dirigé par F. Le Lionnais, Paris, Editions Science et Industrie, sans date : 1959 probablement, 343 p.

[Le Lionnais, F., 1962], Les grands courants de la pensée mathématique, Paris, Blanchard, 1962, 560p.

[Le Moigne, J. L., 1990, 1999], La modélisation des systèmes complexes, Paris, Bordas, 1990 ; Dunod, 1999, 178p.

[Le Moigne, J. L., 1995, 1999], Les épistémologies constructivistes, Paris, PUF, QSJ, 1995 ; 2nde édition : 1999, 127p.

[Le Treut, H. et Jancovici, J. M., 2001], L'effet de serre, Paris, Flammarion, coll. Dominos, 2001, 125p.

[Lebovici, S., 2002], Le bébé, le psychanalyste et la métaphore, Paris, Odile Jacob, 2002, 257p.

[Lebreton, J. D. et Asselain, B., 1993], Biométrie et environnement, Paris, Masson, 1993.

[Lebreton, J. D., 1973], « Introduction aux modèles mathématiques de la dynamique des populations », in Informatique et Biosphère, 1973, pp. 75-116.

[Lebreton, P., 2001], « L'écologie est-elle une science, une philosophie ou une politique ? », Mémoires de l'Académie des Sciences, Belles-Lettres et Arts de Lyon, troisième série, T. 55, année 2000, 2001, p. 83-94.

[Lecourt, D., 1968, 2002], L'épistémologie historique de Gaston Bachelard, Mémoire de maîtrise de Dominique Lecourt, dir. par Georges Canguilhem, Paris, Vrin, 1968 ; onzième tirage augmenté d'une postface de l'auteur : 2002, 125p.

[Lecourt, D., 1972], Pour une critique de l'épistémologie, Paris, Maspero, 1972, 134p.

[Lecourt, D., 1976, 1995], Lyssenko : Histoire réelle d'une « science prolétarienne », Paris, Maspero, 1976 ; réimpression augmentée : Paris, PUF-Quadrige, 1995, 288p.

[Lecourt, D., 1981], L'ordre et les jeux – Le positivisme logique en question, Paris, Grasset, 1981, 348p.

[Lecourt, D., 1990], « De Bachelard au matérialisme historique », Paris, Revue de l'Arc, n° spécial sur Bachelard, Editions Duponchelle, sept. 1990, pp. 5-13.

[Lecourt, D., 1992], « De la nature comme fiction », conférence prononcée en avril 1992, reprise dans À quoi sert donc la philosophie ?, Paris, PUF, 1993, pp. 103-114.

[Lecourt, D., 2001], La philosophie des sciences, Paris, PUF, QSJ, 2001, 127p.

[Lecoustre, R. et Reffye (de), Ph., 1993], « AMAP, un modeleur de végétaux, un ensemble de logiciels de CAO/DAO à l'usage des professionnels de l'aménagement et des paysages », Revue horticole suisse, vol. 66, n°6/7, 1993, pp. 142-146.

[Ledley, R. S., 1959], "Digital Electronic Computers in Biomedical Science", Science, vol. 130, n°3384, 6 November 1959, p. 1225-1234.

[Ledley, R. S., 1965], "Scope of computer applications", in [Waterman, T. H. and Morowitz, H. J., 1965], pp. 250-291.

[Lefebvre, H., 1947], Logique formelle et logique dialectique, Paris, Editions Sociales, 1947, 291p.

[Lefebvre, H., 1957], La pensée de Lénine, Paris, Bordas, 1957, 356p.

[Lefebvre, H., 1965, 2001], Métaphilosophie, Paris, Editions de Minuit, 1965 ; réédition : Editions Syllepse, 2000, 303p.

[Lefebvre, H., 1971, 1975], Au-delà du structuralisme, Paris, Anthropos, 1971 ; modifié et réédité sous le titre : L'idéologie structuraliste, Paris, Seuil, coll. Points, 1975, 253p.

[Lefebvre, H., 2002], Méthodologie des sciences, inédit édité par Rémi Hess, Paris, Anthropos (diffusion par les éditions Economica), 2002, 225p.

[Legay, J. M. et Barbault, R., 1995], La révolution technologique en écologie, collectif dirigé par J. M. Legay et et R. Barbault, Paris, Masson, 1995, 259p.

[Legay, J. M. et Chessel, D., 1977], « Description et analyse de la répartition des insectes dans une population végétale. Cas du doryphore sur pommes de terre », Bulletin d'Ecologie, n°8, pp. 23-34.

[Legay, J. M. et Chessel, D., 1984], « Effectif et taux de masculinité des groupes de chats dans les familles humaines (région lyonnaise) », Génétique Sélection Evolution, n° 16, pp. 185-194.

[Legay, J. M. et Mourgues, C., 1966], « Du rôle de l'héritabilité maximale d'un ensemble de caractères dans l'évolution de ces caractères », Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences, séances hebdomadaires, série D, tome 262, 2 mai 1966, pp. 1979-1981.

[Legay, J. M. et Schmid, A. F., 2002], « Du ver à soie à la modélisation. Comment devient-on indiscipliné ? », entretien d'Anne-Françoise Schmid avec Jean-Marie Legay, Natures Sciences Sociétés, vol. 10, n°1, pp. 59-63.

[Legay, J. M. et Tran-Bugot, A., 1974], « Sur la stabilité morphologique de l'ovocyte terminé chez Bombyx mori *L.* », Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences, séances hebdomadaires, série D, tome 278, 11 mars 1974, pp. 1517-1520.

[Legay, J. M. et Varenne, F., 2001], Entretien transcrit, 21p.

[Legay, J. M., 1968], « Eléments d'une théorie générale de la croissance d'une population », Bulletin of Mathematical Biophysics, vol. 30, 1968, pp. 33-46.

[Legay, J. M., 1971], « Contribution à l'étude de la forme des plantes : discussion d'un modèle de ramification », Bulletin of Mathematical Biophysics, vol. 33, 1971 : 387

[Legay, J. M., 1973a], « La méthode des modèles, état actuel de la méthode expérimentale », in Informatique et Biosphère, 1973, pp. 5-73.

[Legay, J. M., 1973b], « Introduction à l'étude des modèles à compartiments », in Informatique et Biosphère, 1973, pp. 117-145.

[Legay, J. M., 1979a], « Avant-propos », avant-propos du n° spécial sur le thème « Le ver à soie, modèle biologique » de la revue Biochimie, 1979, n°61, pp. 135-136.

[Legay, J. M., 1979b], "Oocyte Growth", Biochimie, 1979, n°61, pp. 137-145.

[Legay, J. M., 1980], « L'informatique et les sciences de la vie », article de l'Encyclopædia Universalis de 1980, remanié pour l'édition de 1989 sur CD-ROM (1995), 6p.

[Legay, J. M., 1981], Qui a peur de la science ?, Paris Editions sociales, 1981, 249p.

[Legay, J. M., 1986a], « Qu'est-ce que la biométrie ? », Le courrier du CNRS, n°64, 1er mars 1986, pp. 56-61.

[Legay, J. M., 1986b], « Diversification des modèles de développement rural : questions et méthodes », transcription de l'intervention au Colloque National du Ministère de la Recherche et de la Technologie, Paris, 17-18 avril 1986, communication personnelle, 10 pages.

[Legay, J. M., 1987], « Contribution à l'étude de la complexité dans les systèmes biologiques », Biologie théorique, Actes du Colloque de Solignac de 1985, Paris, CNRS édition, 1987, pp. 147-165 ; cf. également in Biologie et Economie, éd. par J. Demongeot et P. Malgrange, Dijon, Librairie de l'Université de Bourgogne, 1987, pp. 29-47.

[Legay, J. M., 1987], « Modélisation et protection des plantes », intervention au colloque « Modélisation et protection des plantes », Séance du 22 septembre 1987, C. R. Acad. Agric. Fr., 73, pp. 7-18.

[Legay, J. M., 1990], « De la complexité des objets à la méthode des modèles – Synthèse des travaux du colloque », in [CNRS, 1990], pp. 235-239.

[Legay, J. M., 1994], « La mesure dans les systèmes complexes », in La mesure : instruments et philosophes, Actes du Colloque des 28-29 octobre 1993, au Centre d'Analyse des Formes et des Systèmes de la Faculté de Philosophie de Lyon III, Paris, Champ-Vallon, 1994, pp. 139-146.

[Legay, J. M., 1997], L'expérience et le modèle. Un discours sur la méthode, Paris, INRA éditions, 1997,111p.

[Lehmer, D. H., 2001], "The Lehmers at Berkeley", textes et images à vocation historique présentés par l'administration centrale de l'Université Berkeley de Californie, révisés en 2001, sur le site : www.lib.berkeley.edu/BANC/Exhibits/Math/lehmer.html.

[Lemaître, J., 1990, 1995], « Résistance des matériaux », article de la version de l'Encyclopédia Universalis sur CD-ROM, 1995, correspondant à l'article de la version papier situé vol. 19, pp. 903-910, 1990.

[Lénine, V. I., 1894-1923, 1978, 1982], Textes philosophiques, choix de textes de 1894 à 1923, traduits et publiés une première fois en 1978; traduction remaniée et republiée en 1982, Paris, Editions Sociales, collection Essentiel, 1982, 311p.

[Lénine, V. I., 1908, 1973], Matérialisme et empiriocriticisme, Moscou, Editions du progrès, 1908 ; traduction : Editions sociales, Paris, 1973, 383p.

[Leopold, L. B., 1971], "Trees and Streams : The Efficiency of Branching Patterns", Journal of Theoretical Biology, 31, 1971, pp. 339-354.

[Lepetit, B. et Pumain, D., 1993, 1999], Temporalités urbaines, Paris, Anthropos - Economica, 1993, réimpression : 1999, 321p.

[Leslie, P. H. et Gower, J. C., 1958], "The Properties of a Stochastic Model for Two Competing Species", Biometrika, 45, 1958, pp. 316-330.

[Leslie, P. H., 1945], "On the Use of Matrices in Certain Population Mathematics", Biometrika, vol. 33, part. 3, november 1945, pp. 183-245.

[Leslie, P. H., 1958], "A Stochastic Model for Studying the Properties of Certain Biological Systems by Numerical Methods", Biometrika, 45, 1958, pp. 16-31.

[Lesourne, J., 1980], La notion de système dans les sciences contemporaines, Actes du colloque CNRS - Analyse de Système – Lyon 1980, dir. par J. Lesourne, 2 tomes, Aix-en-Provence, Librairie de l'Université, Tome 1 : Méthodologies, 533p., Tome 2 : Epistémologie, 317p.

[Lévènez, E., 1999], "Computer Languages History", tableau récapitulant les dates de naissances et les rapports mutuels de 50 langages informatiques, disponible sur http://www.levenez.com/lang/.

[Lévêque, C., 2001], Ecologie – De l'écosystème à la biosphère, Paris, Dunod, 502p.

[Levin, S., 1991], "Mathematics and Biology", rapport du Workshop organisé par la National Science Foundation, présidé par Simon Levin et qui s'est tenu à l'Université Cornell en 1991, 80p., accessible à l'adresse http://www.bio.vu.nl/nvtb.

[Lévi-Strauss, C., 1958, 1974], Anthropologie structurale, Paris, Plon (1958) ; spécialement le chap. XV : « la notion de structure en ethnologie », 1974, pp. 303-351.

[Lévi-Strauss, C., 1962, 1985], La pensée sauvage, Paris, Plon (1962) ; Agora (1985), 351p.

[Lévy, J. et Lussault, M., 2000], Logiques de l'espace, esprit des lieux, Colloque de Cerisy édité par J. Lévy et M. Lussault, Paris, Belin, 2000, 352p.

[Lévy, P., 1987], La machine univers – Création, cognition et culture informatique, Paris, La Découverte, 1987, réédition Seuil – Point Sciences, 1992, 240p.

[Lévy, P., 1990], Les technologies de l'intelligence – L'avenir de la pensée à l'ère informatique, Paris, La Découverte, 1990, réédition Seuil – Point Sciences, 1993, 235p.

[Lévy, P., 1998], Qu'est-ce que le virtuel ?, Paris, La Découverte, 1998, 154p.

[Lévy-Leblond, J. M., 1982], « Physique et mathématiques », in Penser les mathématiques, Paris, Seuil, 1982, pp. 194-210.

[Lewontin, R. C., 1974, 2003], "Biological Models", Dictionnary of the History of Ideas, New York, ed. by Philip P. Wiener, published by Charles Scribner's Sons, 1974, vol. 1, pp. 242-247 ; reproduit sur le site du "Electronic Text Center" (University of Virginia Library) : http://etext.lib.virginia.edu/DicHist/dict.html.

[Lewontin, R. C., 1998, 2003], Gene, oganismo e ambiente, Roma-Bari, Gius. Laterza & Figli, 1998 ; traduction augmentée du chapitre 4 : La triple hélice – Les gènes, l'organisme, l'environnement, Paris, Seuil, 2003, 157p.

[Libera (de), A., 1996], La querelle des universaux – De Platon à la fin du Moyen-Âge, Paris, Seuil, coll. Des Travaux, 1996, 511p.

[Lichnerowicz, A., Perroux, F. et Gadoffre, G., 1981], Analogie et connaissance – Tome II : de la poésie à la science, Paris, Maloine, coll. Recherches Interdisciplinaires, 1981, 270p.

[Lindenmayer, A., 1964], "Lide Cycles as Hierachical Relations", in [Gregg, J. R. et Harris, F. T. C., 1964], pp. 416-470.

[Lindenmayer, A., 1968], "Mathematical models for cellular interactions in development. I. Filaments with one-sided inputs", Journal of Theoretical Biology, 18, pp. 280-299 ; "Mathematical models for cellular interactions in development. II. Simple and branchinf filaments with two-sided inputs", Journal of Theoretical Biology, 18, pp. 300-315.

[Lindenmayer, A., 1971], "Developmental systems without cellular interactions, their languages and grammars", Journal of Theoretical Biology, 30, pp. 455-484.

[Lindenmayer, A., 1973], "Cellular automata, formal languages and developmental systems", in Logic, Methodology and Philosophy of Science IV, Proc. Of the 4th intern. Congress for Logic, Methodology and Philosophy of Science, Bucharest, 1971, ed. by P. Suppes, L. Henkin, A. Joja, G. R. C. Moisil, Amsterdam, North Holland Publishing Company, 1973, pp. 677-691.

[Lindenmayer, A., 1975], "Developmental algorithms for multicellular organisms : a survey of L-systems", Journal of Theoretical Biology, 54, pp. 3-22.

[Lindenmayer, A., Rozenberg G., 1976], Automata, Languages, Development, ed. by A. Lindenmayer, and G. Rozenberg, Amsterdam, North-Holland Publishing Company, 1976, 529p.

[Ljund, L., Glad, T., 1994], Modeling of Dynamic Systems, Englewood Cliffs, Prentice Hall Information and System Sciences Series, 1994, 361p.

[Lochak, G., 1994], La géométrisation de la physique, Paris, Flammarion, Champs, 1994, 272p.

[Lotka, A. J., 1924, 1956], Elements of Physical Biology, 1924 ; 2nd edition : Elements of Mathematical Biology, Dover Publications, New York, 1956, 465p.

[Lotodé, R. et Jadin, P., 1981], « Calcul des besoins en engrais des cacaoyers », Café, Cacao, Thé, Vol. 25, n°1, janv.-mars 1981, pp. 3-24.

[Lotodé, R., 1969], « Etude statistique d'une population de mirides », Café, Cacao, Thé, Vol. 13, n°3, juil.-sept. 1969, pp. 216-220.

[Lotodé, R., 1971], « Possibilités d'amélioration de l'expérimentation sur cacaoyers », Café, Cacao, Thé, Vol. 15, n°2, avril-juin 1971, pp. 91-103.

[Louis, P. et Roger, J., 1988], Transfert de vocabulaire dans les sciences, Actes de la Table ronde du CNRS, sous la direction de Pierre Louis et Jacques Roger, Paris, Editions du CNRS, 1988, 338p.

[Löwith, K., 1949, 1953, 2002], Meaning and History, Chicago, Chicago University Press, 1949; version allemande définitive : Weltgeschichte und Heilsgeschehen. Die theologischen Vorraussetzungen der Geschichtsphilosophie, Stuttgart, 1953 ; traduction : Histoire et salut. Les présupposés théologiques de la philosophie de l'histoire, Paris, Gallimard, 2002, 287p.

[Lubashevsky, I.A., Gafiychuk, V.V., 2002], "Analysis of the optimality principles responsible for vascular network architectonics", 12 pages, e-print accessible sur http://arxiv.org/pdf/adap-org 9909003.

[Lucas, H. L., 1964], "Stochastic Elements in Biological Models ; Their Sources and Significances", Stochastic Models in Medicine and Biology, Proc. of a symposium conducted by the Mathematics Research Center, US Army, at the University of Wisconsin, June 12-14, 1963, ed. by J. Gurland, Madison, The University of Wisconsin Press, 1964, pp. 355-385.

[Lück, H. B., 1975], "Elementary Behavioural Rules as a Foundation for Morphogenesis", Journal of Theoretical Biology, vol. 54, pp. 23-34, 1975.

[Luquet, D., 2002], Suivi de l'état hydrique des plantes par infrarouge thermique, thèse de doctorat de l'Institut National Agronomique Paris-Grignon, soutenue le 11 janvier 2002, http://www.teledetection.fr/fichier/these_2/these_luquet.pdf, 167p.

[Lyotard, J. F., 1971, 1978], Discours, figure, Paris, Editions Klincksieck, 1ère édition : 1971, troisième tirage : 1978, 428p.

[Lyotard, J. F., 1973], Dérive à partir de Marx et Freud, Paris, UGE, coll. 10/18, 1973, 317p.

[Lyotard, J. F., 1979], La condition post-moderne, Paris, Editions de minuit, 1979, 109p.

[Mach, E., 1883, 1904, 1987], Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch-kritisch dargestellt, Leipzig, 1883 ; traduction : La mécanique, exposé historique et critique de son développement, Paris, 1904 ; réimpression : Paris, Jacques Gabay, 1987, 498p.

[Mach, E., 1905, 1908], Erkenntnis und Irrtum, Leipzig, 1905 ; traduction : La connaissance et l'erreur, Paris, Ernest Flammarion, 1908, 392p.

[Mach, E., 1911, 1922, 1996], Analyse der Empfindungen, Iéna, 1911, 1922 ; traduction de l'édition définitive et posthume de 1922 : L'analyse des sensations – le rapport du physique au psychique, Paris, Editions Jacqueline Chambon, 1996, 323p.

[Machover, C., 1997], "Computer Graphics Pioneers", Computer Graphics, February 1997, pp. 7-8.

[Mackenzie, D. A., 1981], Statistics in Britain, 1865-1960, Edinburgh University Press, 1981, 306p.

[Maillet, P., 1971], L'économétrie, Paris, PUF, QSJ, 1971, 128p.

[Maini, P. K., Schnell, S. et Jollife, S., 2004], "Bulletin of Mathematical Biology – Facts, Figures and Comparisons", Bulletin of Mathematical Biology, 2004, vol. 66, pp. 595-603.

[Mainzer, K., 1997], Thinking in Complexity, Berlin, Heidelberg, New-York, Springer Verlag, 1997 (3rd edition ; 1rst edition : 1994), 361p.

[Malamoud, C. et Vernant, J. P., 1986], Corps des dieux, collectif sous la direction de Charles Malamoud et Jean-Pierre Vernant, Paris, Gallimard, 1986, réédition : Folio-histoire, 2003, 701p.

[Malécot, G. et Bocquet-Appel, J. P., 1996], « Interview de Gustave Malécot – mai 1993 – avril 1994 », Bull. et Mém. de la Société d'Anthropologie de Paris, n. s. t. 8, 1996, pp. 105-114 ; disponible à l'adresse Internet suivante http://www.ivry.cnrs.fr/deh/bocquet.

[Malécot, G., 1948], Les mathématiques de l'hérédité, Paris, Masson, 1948, 65p.

[Malinvaud, E., 1991], Voies de la recherche macroéconomique, Paris, 1991, 507p.

[Mandelbrot, B., 1975], Les objets fractals : forme, hasard et dimension, Paris, Flammarion, 1975.

[Mandelbrot, B., 1977], The fractal geometry of nature, New York, Freeman, 1977, 468p ; particulièrement les chapitres 16 et 17, pp. 151-165.

[Mandelbrot, B., 1978], "The fractal geometry of trees and other natural phenomena", in Buffon Bicentenary Symposium on Geometrical Probability, Ed. R. Miles and J. Serra, Lecture Notes in Biomathematics, vol. 23, pp. 235-249, New-York, Springer, 1978.

[Mandelbrot, B., 1986], « Comment j'ai découvert les fractales », La Recherche, mars 1986, réédité dans La Recherche, mai 2000, pp. 84-86.

[Mandiau, R., Grislin-Le Strugeon, E. et Péninou, A., 2002], Organisation et applications des SMA, Paris, Hermès-Lavoisier, 2002, 365p.

[Marion, J. L., 1977, 1991], L'idole et la distance, Paris, Editions Grasset & Fasquelle, 1977 ; réimpression : Paris, Livre de Poche, coll. Biblio-essais, 1991, 316p.

[Marquard, O., 1973, 2002], Schwierigkeiten mit der Geschichtsphilosophie, Frankfurt am Main, 1973 ; traduction : Des difficultés avec la philosophie de l'histoire, Paris, Editions de la Maison des Sciences de l'Homme, 2002, 172p.

[Marshall, A. W., 1954], "An introductory note", 2nd Symposium on Monte-Carlo Methods, ed. Herbert A. Meyer, New-York, John Wiley, 1954, pp. 1-14.

[Marticou, H. et Muller, R., 1964], « Essai de mise au point d'une méthode d'expérimentaiton adaptée aux conditions de la cacaoyère camerounaise traditionnelle », Café, Cacao, Thé, Vol. 8, n°3, juillet-septembre 1964, pp. 173-202..

[Martin, T., 1996], Probabilités et critique philosophique selon Cournot, Paris, Vrin/Mathesis, 1996, 362p.

[Martinet, A., 1960], Eléments de linguistique générale, Paris, Armand Colin, 1960, 224p.

[Marx, K. et Engels, F., 1845-1846, 1977], L'idéologie allemande, Tome premier (première partie) : Feuerbach, précédée des « Thèses sur Feuerbach » de Karl Marx, Paris, Editions sociales, 1977, 143p.

[Marx, K. et Engels, F., 1851-1895, 1974], Lettres sur les sciences de la nature, lettres écrites entre 1851 et 1895, Paris, Editions sociales, 1974, 158p.

[Massaux, F., Tchiendji, C., Misse, C. et Decazy, B., 1976], « Etude du transport de pollen de cacaoyer par marquage au ^{32}P », Café, Cacao, Thé, Vol. 20, n°3, juil.-sept. 1976, pp. 163-172.

[Masson, J. P., 1987], « Un essai de résumé et quelques remarques d'un biométricien », synthèse du colloque « Modélisation et protection des plantes », Séance du 22 septembre 1987, C. R. Acad. Agric., Fr., 1987, 73, n°7, pp. 193-198.

[Mathelot, P., 1969], L'informatique, Paris, PUF, QSJ, 1969, 128p.

[Matoré, G., 1962], L'espace humain, Paris, La Colombe, 1962, 299p.

[Mattelart, A., 1994], L'invention de la communication, Paris, La Découverte, 1994, 380p.

[Matthieu, P. et Müller, J. P., 2002], Systèmes multi-agents et systèmes complexes, Actes des 10èmes Journées Francophone pour l'Intelligence Artificielle Distribuée et les Systèmes Multi-Agents (JFIADSMA'02) qui se sont tenues à Lille en 2002 ; Paris, Hermès-Lavoisier, 2002, 266p.

[Mayet, L., 2001], Dieu joue-t-il aux dés ? L'empire des probabilités, numéro hors-série de Sciences et Avenir, dir. par L. Mayet, n°128, octobre-novembre 2001, 98p.

[Mayr, E., 1982, 1989, 1995], The Growth of Biological Thought. Diversity, Evolution and Inheritance, The Belknap Press of Harvard University Press, 1982 ; traduction : Histoire de la biologie. Diversité, évolution et hérédité, Paris, Fayard, 1989 ; réédition : Paris, Livre de Poche, 199,5, 1205p.

[Mayrat, A., Rollin, P. et Kahn, A., 1990, 1995], « Croissance (biologie) », article de l'Encyclopaedia Universalis, édition 1989, sur CD-ROM : 1995, 20 pages.

[McCulloch, W. S. and Pitts, W., 1943], "A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity", Bulletin of Mathematical Biophysics, 1943, vol. 5, pp. 115-133 ; traduction partielle in [Pélissier, A. et Tête, A., 1995], pp. 62-69.

[McLeod, J., 1980a], "Verification, validation and transfer of societal models", Simulation, February 1980, pp. vii-x.

[McLeod, J., 1980b], "All about validation", Simulation, July 1980, pp. vii-x.

[McLeod, J., 1986], "Computer modeling and simulation : The changing challenge", Simulation, March 1986, pp. 114-118.

[Meier, D., 2003], "HP 9825 A/S Desktop Computer Specifications", manuel de spécifications du calculateur HP 9825, http://www.n4mw.com/hp9825/spec/spec01.jpg.

[Meinhardt, H., 2004], "Phyllotaxis : Helical arrangement of leaves and staggered dots on shells – two corresponding patterns", presentation des travaux de Hans Meinhardt accessible sur le site de l'auteur à l'adresse http://www.eb.tubingen.mpg.de/dept4/meinhardt/phyllo.html.

[Mejer, H., 1983], "The Computer as a Modelling Tool", in [Jorgensen, S. E., 1983], pp. 17-53.

[Metropolis, N. and Ulam, S., 1953], "A property of randomness of an arithmetical function", Amer. Math. Monthly, 60, 1953, pp. 252-253.

[Meyerson, E., 1907, 1932], Identité et réalité, Paris, Félix Alcan, 1907 ; 4ème édition : 1932, 571p.

[Meyerson, E., 1925, 1992], La déduction relativiste, Paris, Payot, 1925 ; réimpression : Paris, Editions Jacques Gabay, 1992, 396p.

[Michalewicz, M. T., 1997], Plants to ecosystems. Advances in Computational Life Sciences, Vol. 1: "Modelling of Biological Structures and Processes", Melbourne, CSIRO Publishing, Michalewicz ed., 1997, 140p.

[Michalsky, J. et Arditi, R., 1996], « La structure de réseau trophique à l'équilibre et loin de l'équilibre : est-elle la même ? », in Tendances nouvelles en modélisation pour l'environnement, Actes du colloque CNRS des 16-17 janvier 1996 – Programme Environnement du CNRS, Paris, 1996, édition complète à diffusion restreinte, fascicule « posters : thème A », pp. 134-138.

[Michaud, Y., 2003], Le Renouvellement de l'observation dans les sciences, Université de tous les savoirs (UTLS), collectif dirigé par Yves Michaud, Paris, Odile Jacob, 2003, 282p.

[Mickulecky, D. C., 1996], "Robert Rosen : the well posed question and its answer – Why are organisms different form machines ?", article de 1996, sans lieu, 12 pages, accessible sur le site http://view.vcu.edu/~mikuleck/.

[Milcou, S. M., 1971], « Les mathématiques dans les sciences biologiques et médicales », in Recherches sur la philosophie des sciences, Bucarest, Editions de l'Académie de la République Socialiste de Roumanie, 1971, p. 233-243.

[Miller, A. I., 1996, 2000], Imagery and Creativity in Science and Art, New-York, Springer Verlag, 1996 ; traduction : Intuitions de génie – Images et créativité dans les sciences et les arts, Paris, Flammarion, 2000, 457p.

[Milner, J. C., 2002], Le périple structural – Figures et paradigme, Paris, Seuil, 2002, 248p.

[Mode, C.J., 1966a], "Some multi-dimensional branching processes as motivated by a class of problems in mathematical genetics I", Bulletin of Mathematical Biophysics, vol. 28, 1966, pp. 25-50.

[Mode, C.J., 1966b], "Restricted transition probabilities and their applications to some problems in the dynamics of biological populations", Bulletin of Mathematical Biophysics, vol. 28, 1966, pp. 315-331.

[Mode, J.C., 1966c], "A multi-dimensional birth process and its application to some problems in the dynamics of biological populations", Bulletin of Mathematical Biophysics, vol. 28, 1966, pp. 333-345.

[Modeling & Simulation, 2002], "50th Anniversary Issue", Modeling & Simulation, vol. 1, n°3, july-september 2002, 44p.

[Modeling & Simulation, vol. (volume), n° (number), (month-month+2) year], publication, depuis janvier 2002, de la Society of Modeling and Simulation International, nouveau nom de la Society for Computer Simulation depuis janvier 2002.

[Molenaar, H., Barthélémy, D., de Reffye, P., Meinesz, A. et Mialet, I., 2000], "Modeling architecture and growth patterns of *Posidonio oceanica*", Aquatic Botany, 2000, vol. 66, pp. 85-99.

[Moles, A. A., 1995], Les sciences de l'imprécis, Paris, Seuil, coll. Points-Sciences, 1995, 360p.

[Mondzain, M. J., 1996], Image, icône, économie – Les sources byzantines de l'imaginaire contemporain, Paris, Seuil, coll. L'ordre philosophique, 1996, 299p.

[Monferran, J. P., 1998], « L'affaire Lyssenko », L'Humanité, 14 avril 1998 ; accessible sur les archives internet du journal à l'adresse http://www.humanite.fr/journal/1998-04-14.

[Mongin, P., 2001], « La théorie économique a-t-elle besoin des mathématiques ? », Commentaire, n°93, printemps 2001, pp. 129-140.

[Monod, J. C., 2002], La querelle de la sécularisation de Hegel à Blumenberg, Paris, Vrin, 2002, 317p.

[Monod, J., 1970a], Le hasard et la nécessité, Paris, Seuil, 1970.

[Monod, J., 1970b, 2000], « Les frontières de la biologie », Atomes, 1970, octobre ; réimpression : La Recherche, 2000, mai, n°spécial : 30 ans de science et de recherche, pp. 21-24.

[Monroe Computer Museum of America, 2002], "Monroe Mechanical Adding-Calculator", 1 page de document sur http://www.computer-museum.org/collections/monroe_addc.html.

[Monsef, Y., 1997], Modeling and Simulation of Complex Systems – Concepts, Methods and Tools, San Diego, SCS Int., 1997, 296p.

[Mooney, C. Z., 1997], Monte-Carlo Simulation, Series : Quantitative Applications in the Social Sciences, Thousand Oaks – London – New Delhi, Sage University Paper, 1997, 103p.

[Morange, M., 1994], Histoire de la biologie moléculaire, Paris, La Découverte, 1994, 357p.

[Morgan, M.S. et Morrison, M., 1999], Models As Mediators, ed. by M.S. Morgan and M. Morrison, Cambridge, Cambridge University Press, 1999, 401p.

[Morin, E., 1977, 1981], La méthode – 1. La Nature de la Nature, Paris, Seuil, 1977 ; Points-Seuil, 1981, 412p.

[Morin, E., 1980, 1985], La méthode – 2. La Vie de la Vie, Paris, Seuil, 1977 ; Points-Seuil, 1981, 482p.

[Morin, E., 1991], La méthode – 4. Les idées, Paris, Seuil, 1991, Points-Seuil, 1995, 264p.

[Mosconi, J., 1989], La constitution de la théorie des automates, Thèse de doctorat d'Etat, sous la direction de Suzanne Bachelard, Paris, I, 1989.

[Mouloud, N., 1968], Les structures, la recherche et le savoir, Paris, Payot, 1968, 307p.

[Mouloud, N., 1969], Langages et structures, Paris, Payot, 1969, 252p.

[Mounin, G., 1968, 2000], Clefs pour la linguistique, Paris, Seghers, 1968 ; réimpression : Paris, Bibliothèques 10/18, 173p.

[Mounin, G., 1972], La linguistique au XXème siècle, Paris, PUF, coll. Sup., 1972, 253p.

[Müller, A., 2000], « Eine kurze Geschichte des BCL – Heinz von Foerster und das Biological Computer Laboratory », 17 pages d'Albert Müller, 2000, accessibles sur le site http://www.univie.ac.at/constructivism/papers/mueller/mueller00-bcl.html.

[Murray, C. D., 1926], "The physiological principle of minimum work applied to the angle of branching arteries", The Journal of General Physiology, July 1926, vol. 9, pp. 835-841.

[Murray, C. D., 1927], "A relationship between circumference and weight in trees and its bearing on branching angles", The Journal of General Physiology, May 1927, vol. 10, pp. 725-729.

[Murray, C. D., 1931], "The physiological principle of minimum work – A reply", The Journal of General Physiology, March 1931, vol. 14, p. 445.

[Nadeau, R., 1999], Vocabulaire technique et analytique de l'épistémologie, Paris, PUF, collection premier cycle, 1999, 863p.

[Nagel, E. *et al.,* 1958, 1989, 1997], Gödel's proof, New York University Press, 1958 ; traduction : Le théorème de Gödel, Paris, Seuil, 1989 ; réimpression : Points-Seuil, 1997, 184p.

[Nagel, E., 1960, 1979], The Structure of Science, 1ère edition : 1960, Indianapolis, Hackett Publishing Company ; réédition : 1979, 618p.

[Nagylaki, T., 1989], "Gustave Malécot and the Transition from Classical to Modern Population Genetics", Genetics, June 1989, 122, pp. 253-268.

[Nancy, J. L., 2001], L'art et la mémoire des camps – Représenter exterminer, n°36 de la revue Genre Humain, dir. par Jean-Luc Nancy, Paris, Seuil, 134p.

[Napur, J. N., 1988], Mathematical Modelling, New York, John Wiley & Sons, 1988, 511p.

[Naylor, T. H., Balintfy, J. L., Burdick, D. S. and Chu, K., 1966], Computer Simulation Techniques, New York, John Wiley and Sons, Inc., 1966, 352p.

[Neumann (von), J., 1932a], "Proof of the quasi-ergodic theorems", N.A.S. Proc., 18, pp. 70-82 ; repinted in Collected Works, A. H .Taub (ed.), Volume II, Oxford, Pergamon Press, 1961, pp. 261-273.

[Neumann (von), J., 1932b], "Physical applications of the ergodic hypothesis", N.A.S. Proc., 18, pp. 263-266 ; repinted in Collected Works, A. H .Taub (ed.), Volume II, Oxford, Pergamon Press, 1961, pp. 274-277.

[Neumann (von), J., 1948, 1951, 1996], "The general and logical theory of automata", in Cerebral Mechanisms and Behaviour, Lloyd A. J. ed., New York, John Wiley and Sons, 1951 ; traduction par J. P. Auffrand : Théorie générale et logique des automates, Champ-Vallon, coll. Milieux, 1996.

[Neumann (von), J., 1958, 1996], The Computer and the Brain, 1958, sans lieu ; traduction : L'ordinateur et le cerveau, Paris, Champs-Flammarion, 1996, 129p.

[Neumann (von), J., 1966], Theory of self-reproducing automata, edited and completed by A. W. Burks, Urbana IL : University of Illinois Press.

[Neyrat, F., 2003], L'image hors-l'image, Paris, Editions Léo Scheer, coll. Manifeste, 2003, 221p.

[Nicolis, G. et Prigogine, I., 1989], Exploring complexity : An introduction, Munich, KG Verlag ; traduction : À la rencontre du complexe, Paris, PUF, 1992, 382p.

[Nietzsche, F., 1993, Tome I], Œuvres, Tome I, Paris, Robert Laffont, coll. Bouquins, 1993, 1552p.

[Nietzsche, F., 1993, Tome II], Œuvres, Tome II, Paris, Robert Laffont, coll. Bouquins, 1993, 1792p.

[NIH, 2000], "Laboratory Instrument Computer (LINC) – The Genesis of a Technological Revolution", par Samuel Rosenfeld, disponible le 22/06/2000 sur le site des National Institutes of Health, adresse : http://www.nih.gov/od/museum/exhibits/linc/2.html

[Niklas, K. J., 1986], "Computer simulations of branching-patterns and their implications on the evolution of plants", Lecture Notes on Mathematics in the Life Sciences, vol. 18, 1986, pp. 1-50.

[Niklas, K. J., 2000], "The Evolution of Plant Body Plans – A Biomechanical Perspective", Annals of Botany, 2000, vol. 85, pp. 411-438.

[Nora, S. et Minc, A., 1978], L'informatisation de la société, Rapport remis au Président de la République + 4 volumes d'annexes numérotés de 1 à 4, Paris, La Documentation Française, 1978.

[Normand, C., 1976], Métaphore et concept, Bruxelles, Editions Complexe, 1976, 162p.

[Nosenzo, R., Reffye (de), Ph., Blaise, F. et Le Dimet, F. X., 2001], in [CIRAD-INRA, 2001], pp. 145-172.

[Noth, M., Borning, A. et Waddell, P., 2002], "An extensible, modular architecture for simulating urban development, transportation, and environmental impacts", à paraître dans Computers, Environment and Urban Systems, 2002, 23 pages.

[Nouvel, P., 2002], Enquête sur le concept de modèle, coll. dirigé par Pascal Nouvel, Paris, PUF, 2002, 246p.

[NSS, (année), (volume), (numéro)], Natures Sciences Sociétés, Paris, Elsevier, parution à partir de 1993.

[Nygaard, K. et Dahl, O. J., 1978], "The Developement of the Simula Languages", AGM SIGPLAN Notices, ACM, vol. 13, n°8, August 1978, pp. 245-272.

[Odum, E. P., 1953, 1959], Fundamentals of Ecology, 2nd edition, Philadelphia, W. B. Saunders Company, 1959, 546p.

[Odum, E. P., 1963, 1975], Ecology, New York, 1963 ; traduction : Ecologie – Un lien entre les sciences naturelles et les sciences humaines, Montréal, édition HRW, 1975, 254p.

[Odum, H. T. et Odum, E. C., 2000], Modelling for all scales – An introduction to system simulation, San Diego, Academic Press, 2000, 458p.

[Oldeman, R. A. A, 1974], L'architecture de la forêt guyanaise, Paris, Mémoire de l'ORSTOM, n°73, 1974, 204p.

[Oldeman, R. A. A., 1972], L'architecture de la forêt guyanaise. Th. Doct. Etat, Université de Montpellier II, France, 247p.

[Oppenheimer, P. E., 1986], "Real Time Design and Animation of Fractal Plants and Trees", SIGGRAPH'86, Computer Graphics, vol. 20 (4), August 18-22, pp. 55-64.

[Orange, C., 1997], Problèmes et modélisation en biologie, Paris, PUF, 1997, 241p.

[Ortigues, E., 1962, 1977], Le discours et le symbole, Paris, Aubier, coll. philosophie de l'esprit, 1962, réimpression en 1977, 230p.

[Ory, P., 1987], Nouvelle histoire des idées politiques, Paris, Hachette-Pluriel, 1987, 832p.

[Ottorini, J. M., 1995], « Simulation et sylviculture du douglas », in [RFF, 1995, vol. 47], pp. 97-105.

[Panza, M. et Pont, J. C., 1992], Espace et horizon de réalité – Philosophie mathématique de Ferdinand Gonseth, Paris, Masson, 1992, 194p.

[Papaionnou, K., 1965, 1975], Marx et les marxistes, Paris, Flammarion, 1972, 505p.

[Parain-Vial, J., 1985], Philosophie des sciences de la nature, Paris, Klincksieck, 2ème édition refondue : 1985, 269p.

[Paris, E., 1984], « Un nouvel outil : la conception assistée par ordinateur », Revue du Palais de la Découverte, juillet-août-septembre 1984, pp. 37-45.

[Parrochia, D., 1990], « Quelques aspects épistémologiques et historiques des notions de « système » et de « modèle » », in [CNRS, 1990], pp. 215-233.

[Parrochia, D., 1991], Mathématiques et existence, Paris, Champ Vallon, 253p.

[Parrochia, D., 1992], Qu'est-ce que penser/calculer ?, Paris, Vrin, coll. Pré-textes, 1992, 128p.

[Parrochia, D., 1993a], La raison systématique, Paris, Vrin, 1993, 320p.

[Parrochia, D., 1993b], Philosophie des réseaux, Paris, PUF, 1993, 300p.

[Parrochia, D., 1994], Cosmologie de l'information – Pour une nouvelle modélisation de l'univers informationnel, Paris, Hermès, 1994, 282p.

[Parrochia, D., 1997], Les grandes révolutions scientifiques du XXème siècle, Paris, PUF, 1997, 434p.

[Parrochia, D., 1998], La conception technologique, Paris, Hermès, 1998, 269p.

[Parrochia, D., 2000], « L'expérience dans les sciences : modèles et simulation », in Qu'est-ce que la vie ?, conférence du 15 janvier 2000, Université de tous les savoirs, Paris, Odile Jacob, 2000, pp. 193-203.

[Parrochia, D., 2001], « Algorithmique et complexité : les limites de l'informatique », Annales d'histoire et de philosophie du vivant, vol. 5, Paris, Seuil, 2001, pp. 143-173.

[Parvais, J. P., Reffye (de), Ph. et Lucas, P., 1977], « Observations sur la pollinisation libre chez *Theobroma Cacao* : analyse mathématique des données et modélisation », Café, Cacao, Thé, Vol. 21, n°4, oct.-déc. 1977, pp. 253-262.

[Pasta, J. R., and Ulam, S., 1959], "Heuristic numerical work in some problems of hydrodynamics", Math. Tables Aids Comput., 13, 1959, pp. 1-12.

[Pasternak, G. P., Ponthieu, G. et Treguer, M., 1987], Création et désordre, collectif, transcription d'entretiens diffusés sur France Culture avec des chercheurs contemporains, préface de M. Cazenave, Paris, L'originel, 1987, 173p.

[Patocka, J., 1968, 2001], „Husserls Anschauungsbegriff und das Urphänomen der Sprache", Archives du 14ème Congrès International de Philosophie, Vienne, 1968, chapitre 8 ; réimpression et traduction par Philippe Merlier : « Le concept d'intuition chez Husserl et le protophénomène du langage », Recherches Husserliennes, 2001, vol. 16, pp. 3-12.

[Patten, B. C., 1959], "An Introduction to the Cybernetics of the Ecosystem : the Trophic-Dynamic Aspect", Ecology, 40, 1959, pp. 221-231.

[Pauly, P. J., 1987], Controlling Life – Jacques Loeb & the Engineering Ideal in Biology, Berkeley, University of California Press, 1987, 256p.

[Pavé, A. *et al*., 1996], Première revue externe de l'unité de modélisation des plantes, CIRAD, 1996, 53p.

[Pavé, A., 1979], "Dynamics of macromolecular populations : a mathematical model of the quantitative changes of RNA in the silkgland during the last larval instar", Biochimie, 1979, n°61, pp. 263-273.

[Pavé, A., 1987], « Schémas fonctionnels et modélisation. Etudes de modèles de la dynamique des populations », in Biologie et Economie, éd. par J. Demongeot et P. Malgrange, Dijon, Librairie de l'Université de Bourgogne, 1987, pp. 223-250.

[Pavé, A., 1994], Modélisation en biologie et en écologie, Lyon, Aléas Editeur, 1994, 559p.

[Pavé, F., 2002], « Du concept pur aux applications pratiques et retour – Les tribulations de l'Institut Henri Poincaré et de l'Institut de la Statistique de l'Université de Paris », Gérer et Comprendre, mars 2002, n°67, pp. 63-66.

[Pearson, K., 1892, 1937, 1949], The Grammar of Science, London, The Temple Press, 1892 ; réédition modifiée : London, J. M. Dent & Sons Ltd., 1937, reimpression : 1949, 357p.

[Pélissier, A. et Tête, A., 1995], Sciences cognitives – Textes fondateurs (1943-1950), Rassemblés et traduits par A. Pélissier, présentés et annotés par A. Tête, Paris, PUF, coll. Psychologie et sciences de la pensée, 1995, 313p.

[Penfield, P., 2000], "Samul Jefferson Mason", biographie de S. J. Mason écrite par P. Penfield, disponible sur http://www-eecs.mit.edu/gret-educators/mason.html.

[Perrin, J., 1913, 1991], Les atomes, Paris, Flammarion, collection « Champs », réédition du texte de 1913, 1991, 292p.

[Perttunen, J., Nikinmaa, E., Lechowicz, M.J, Sievänen, R. et Messier, C., 2001], "Application of the Functional-Structural Tree Model LIGNUM to Sugar Maple Saplings (*Acer saccharum* Marsh) growing in Forest Gaps", Annals of Botany, 88, 2001, pp. 471-481.

[Perttunen, J., Sievänen, R., Nikinmaa, E., Salminen, H., Saarenmaa, H. et Väkeva, J., 1996], “LIGNUM : A Tree Model Based on Simple Structural Units”, Annals of Botany, 77, 1996, pp. 87-98.

[Pestre, D., 1996], « Les “Social Studies of Science” », Raison Présente, 3ème trimestre 1996, n°119, pp. 35-46.

[Pestre, D., 2002], « La pensée mathématique des systèmes », La Recherche, Hors-Série, n°7, avril-juin 2002, pp. 10-15.

[Peterfalvi, J. M., 1970], Introduction à la psycholinguistique, Paris, PUF, coll. SUP, 1970, 160p.

[Petersons, I., 1995], Le chaos dans le système solaire, trad. Française : Paris, Belin – Pour la science, 1995, 288p.

[Petitot, J., 1985], Morphogenèse du sens - I, Paris, PUF, 1985, 306p.

[Petitot, J., 1988], Logos et théorie des catastrophes, Actes du colloque international de 1982 « À partir de l’œuvre de René Thom » éd. par J. Petitot, Genève, Editions Patino, coll. Colloques de Cerisy, 1988, 515p.

[Petitot, J., 1989, 1995], « Forme », article de l’édition de l’Encylopaedia Universalis de 1989, 39 pages sur la version CD-ROM de 1995.

[Petitot, J., 1992, 2000], Physique du sens – De la théorie des singularités aux sructures sémio-narratives, Paris, CNRS Editions, 1992 ; réimpression : 2000, 449p.

[Petitot, J., Varela, F. J., Pachoud, B. et Roy, J. M., 1999, 2002], Naturalizing Phenomenology : Issues in Contemporary Phenomenology and Cognitive Science, Stanford University Press, 1999 ; version française : Naturaliser la phénoménologie – Essai sur la phénoménologie contemporaine et les sciences cognitives, Paris, CNRS Editions, coll. Communication, 2002, 793p.

[Piaget, J., 1967], « La représentation ‘concrète’ », in Logique et connaissance scientifique, collectif sous la dir. de Jean Piaget, Paris, Pléiade, 1967, pp. 772-778.

[Piaget, J., 1970], Psychologie et épistémologie, Paris, Editions Denoël-Gonthier, 1970, 189p.

[Piaget, J., 1970, 1972], L’épistémologie génétique, Paris, PUF, QSJ, 1ère édition : 1970, 2ème édition : 1972, 127p.

[Piattelli-Palmarini, M., 1975, 1979], Théories du langage – Théories de l’apprentissage - Le débat entre Jean Piaget et Noam Chomsky, Actes du colloque de 1975 ; Paris, Seuil, coll. Points, 1979, 541p.

[Picard, J. F., 1990], La république des savants - La recherche française et le CNRS, Paris, Flammarion, 1990, 339p.

[Pichot, A., 1993], Histoire de la notion de vie, Paris, Gallimard-TEL, 1993, 973p.

[Pichot, A., 1999], Histoire de la notion de gène, Paris, Champs-Flammarion, 1999, 347p.

[Picon, G., 1957], Panorama des idées contemporaines, collectif sous la direction de Gaëtan Picon, Paris, NRF, coll. Le point du jour, 1957, 793p.

[Pierobon, F., 2003], Kant et les mathématiques, Paris, Vrin, 2003, 240p.

[Pinel, E., 1973], Les fondements de la biologie mathématique non statistique, Paris, Maloine, 1973.

[Pinel, E., 1981], Physique de la cellule vivante, Paris, Maloine, 1981, 162p.

[Pinker, S., 1997, 2000], How the Mind Works, W. W. Norton & Company (sans lieu), 1997 ; traduction : Comment fonctionne l’esprit ?, Paris, Odile Jacob, 2000, 680p.

[Poincaré, H., 1902, 1968, 1989], La science et l’hypothèse, Paris, 1902, réédition présentée par Jules Vuillemin : 1968, réimpression en Champs-Flammarion, 1989, 252p.

[Poirier, H., 2003], « La théorie constructale, clé des formes parfaites », Science et Vie, novembre 2003, n°1034, pp. 45-63.

[Polya, G., 1945, 1957, 1990], How to solve it, Princeton University Press, 1945 ; second edition : 1957, avec une préface de Ian Stewart, London, Penguin Books, 1990, 253p.

[Pommier, G., 2004], Qu’est-ce que le réel ?, Paris, Editions érès, 2004, 146p.

[Poorter, H. et Garnier, E., 1996], “Plant Growth Analysis : an evaluation of experimental design and computantional methods”, Journal of Experimental Botany, September 1996, vol. 47, pp. 1343-1351.

[Poorter, H., 1989], ”Plant Growth Analysis : towards a synthesis of the classical and the functional approach”, Physiologia Plantarum, 1989, vol.75, pp. 237-244.

[Popper, K., 1934, 1959, 1968, 1973], The Logic of Scientific Discovery, première édition en allemand : Vienne, 1934 ; deuxième édition, en anglais : London, Hutchinson Co., 1959, puis 1968 ; traduction : La logique de la découverte scientifique, Paris, Payot, 1973, 480p.

[Popper, K., 1956, 1976, 1988], The Poverty of Historicism, premier article publié en 1956 dans Economica ; neuvième édition remaniée : The Poverty of Historicism, London, Routledge & Kegan, 1976 ; traduction française de 1956 reprise par R. Bouveresse : Misère de l’historicisme, Paris, Plon, coll. Pocket-Agora, 1988, 211p.

[Popper, K., 1963, 1985], Conjectures and Refutations, London, Routledge and Kegan, 1963 ; traduction : Conjectures et réfutations, Paris, Payot, 1985, 610p.

[Popper, K., 1972, 1991, 1998], Objective Knowledge, Oxford, Oxford University Press, 1972 puis 1979 ; traduction : Paris, Aubier, 1991 ; édition de poche : Champs-Flammarion, 1998, 578p.

[Pouget, J. M., 2001], La science goethéenne des vivants – De l’histoire naturelle à la biologie évolutionniste, Bern, Peter Lang, coll. contacts, 2001, 433p.

[Poulain, J., 1993], La loi de vérité ou la logique philosophique du jugement, Paris, Albin Michel, coll. Bibliothèque du Collège international de philosophie, 1993, 266p.

[Pratt, V., 1987, 1995], Thinking Machines. The Evolution of Artificial Intelligence, Basil Blackwell, New York, 1987, traduction : Machines à penser. Une histoire de l'intelligence artificielle, Paris, PUF, coll. Sciences Modernités Philosophies, 1995, 299p.

[Prawitz, D. *et al*., 1994], Logic, Methodology and Philosophy of Science IX, Proc. of the 9th International Congress for Logic, Methodology and Philosophy of Science, ed. by D. Prawitz, B. Skyrms and D. Westerstahl, Elsevier Science, 1994.

[Prenant, M., 1935], Biologie et marxisme, Paris, Editions Sociales Internationales, 1935.

[Pressat, R., 1981], Les méthodes en démographie, Paris, PUF, QSJ, 1981, 128p.

[Prigogine, I. et Stengers, I., 1979], La nouvelle alliance, Paris, Gallimard, 1979, 443p.

[Prigogine, I. et Stengers, I., 1992], Entre le temps et l'éternité, Paris, Arthème Fayard, 1988 ; 2ème édition : Flammarion, 1992, 223p.

[Prigogine, I., 1996, 2001], La fin des certitudes – Temps, chaos et lois de la nature, Paris, Poches Odile Jacob, 1996, 230p.

[Pring, M., 1969], "The analysis of electron transport kinetics in mitochondria", in [Heinmetz, F., 1969], pp. 75-104.

[Pritsker, A.A.B., 1979], "Compilation of definitions of simulation", Simulation, August 1979, pp. 61-63.

[Propp, V., 1928, 1969, 1970], Morphologie du conte, 1ère édition en russe : 1928, 2ème édition en russe : 1969, traduction : Paris, Seuil, 1970, 255p.

[Proust, J. et Schwartz, E., 1995], La connaissance philosophique – Essais sur l'œuvre de Gilles-Gaston Granger, Paris, PUF, coll. Modernités, 1995, 357p.

[Prusinkiewicz, P. et Lindenmayer, A., 1990], The algorithmic beauty of plants, New York, Springer Verlag, 1990, 228p.

[Prusinkiewicz, P., 1997], "Visual Models of Morphogenesis : A Guided Tour ", Calgary, 1997, disponible sur http://www.cpsc.ucalgary.ca/projects/bmv/vmm-deluxe/TableOfContents.html .

[Prusinkiewicz, P., 1998], "Modeling of spatial structre and development of plants : a review", Scientia Horticulturae, 1998, vol. 74, pp. 113-149.

[Prusinkiewicz, P., 2003], "Modeling plant growth and development", Current Opinion in Plant Biology, 2003, vol. 7, n°1, pp. 1-5.

[Prusinkiewicz, P., Lindenmayer, A. et Hanan J., 1988], "Developmental models of herbaceous plants for computer imagery purposes",Computer Graphics, 22, pp. 141-150.

[Pumain, D. et Robic, M. C., 2002], « Le rôle des mathématiques dans une "révolution" théorique et quantitative : la géographie française depuis les années 1970 », in [RHSH, 6, 200], pp. 123-144.

[Pumain, D. et Varenne, F., 2002], Entretien transcrit, 26p.

[Pumain, D., 1982a], La dynamique des villes, Paris, Economica, 1982, 231p.

[Pumain, D., 1986], « Analogie entre les modalités d'évolution des systèmes urbains et celles des systèmes hiérarchiques ouverts », in [Wolkowski, Z. W., 1986], pp. 319-346.

[Pumain, D., 1989], Villes et auto-organisation, Paris, Economica, 1989, 191p.

[Pumain, D., 1998b], « Les modèles d'auto-organisation et le changement urbain », Cahiers de Géogaphie du Québec, Vol. 42, n°117, décembre 1998, pp. 349-366.

[Pumain, D., 2003], « L'émergence des villes », Pour la science, n°314, décembre 2003, pp. 134-138

[Quastler, H., 1965], "General principles of systems analysis", in [Waterman, T. H., and Morowitz, H. J., 1965], pp. 313-333.

[Quéau, P., 1986], Eloge de la simulation, Paris, Champ-Vallon, coll. « Milieux », 1986, 260p.

[Quéau, P., 1994], Le virtuel, Paris, Champ Vallon, coll. « Milieux », 1994, 217p.

[Raison Présente, 1972], Epistémologie et marxisme, recueil d'articles parus dans Raison Présente, Paris, UGE, 10/18, 1972, 313p.

[Ramis, E., Deschamps, et Odoux, J., 1976, 1988], Cours de mathématiques spéciales – Topologie et éléments d'analyse, Tome 3, Paris, 1976 ; seconde édition : 1988, 362p.

[Ramunni, G., 1989a], La physique du calcul – Histoire de l'ordinateur, Paris, Hachette, 1989, 287 p.

[Ramunni, G., 1989b], « L'industrie française du logiciel », Science & Vie, n° Hors-Série : 200 ans de science 1789-1989, mars 1989, pp. 305-307.

[Ramunni, G., 1989c], « La non-construction du premier calculateur électronique au CNRS », Cahiers pour l'Histoire du CNRS, vol. 4, 1989, éditions du CNRS, pp. 113-142.

[Ramunni, G., 1995], Les sciences pour l'ingénieur – Histoire du rendez-vous des sciences et de la société, Paris, CNRS éditions, 1995, 148p.

[Rancière, J., 1974], La leçon d'Althusser, Paris, Gallimard, coll. Idées, 1974, 277p.

[Randall, J. E., 1980], Microcomputers and Physiological Simulation, London, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1980, 235p.

[Rapaport, D. C., 1995], The Art of Molecular Dynamics Simulation, Cambridge, Cambridge University Press, 1995.

[Rashevsky, N., 1934a], “Foundations of Mathematical Biophysics”, Philosophy of Science, 1934, vol. 1, n°2, pp. 176-196.
[Rashevsky, N., 1934b], “Physico-Mathematical Aspects of the Gestalt-Problem”, Philosophy of Science, 1934, vol. 1, n°4, pp. 409-419.
[Rashevsky, N., 1935a], “The Biophysics of Space and time”, Philosophy of Science, 1935, vol. 2, n°1, pp. 73-85.
[Rashevsky, N., 1935b], “Outline of a Mathematical Theory of Human Relation”, Philosophy of Science, 1935, vol. 2, n°4, pp. 413-430.
[Rashevsky, N., 1938, 1948], Mathematical Biophysics (1vol.), Chicago, University of Chicago Press, 1938, first edition : 1938, 2nd edition : 1948.
[Rashevsky, N., 1955], “Life, information theory, and topology”, Bulletin of Mathematical Biophysics, vol. 17, 1955, pp. 229-235.
[Rashevsky, N., 1958a], “A contribution to the search of general mathematical principles in biology”, Bulletin of Mathematical Biophysics, vol. 20, 1958, pp. 71-93.
[Rashevsky, N., 1958b], “A comparison of set-theoretical and graph-theoretical approaches in topological biology”, Bulletin of Mathematical Biophysics, vol. 20, 1958, pp. 267-273.
[Rashevsky, N., 1958c], “A note on biotopology of reproduction”, Bulletin of Mathematical Biophysics, vol. 20, 1958, pp. 275-280.
[Rashevsky, N., 1960a], Mathematical Biophysics – Physico-mathematical Foundations of Biology (2 vol.), Chicago, University of Chicago Press, 1938, 3rd edition : 1960.
[Rashevsky, N., 1960b], “Mathematical Models and General Mathematical Principles in Biology”, Nuovo Cimento, supplemento al volume XVIII, série X, n°2, 4ème trimestre, pp. 140-148.
[Rashevsky, N., 1961], Mathematical Principles in Biology and their Applications, Springfield – Illinois, Charles C. Thomas Publisher, 1961, 128p.
[Rashevsky, N., 1964], “The devious roads of science”, in [Gregg, J. R. et Harris, F. T. C., 1964], pp. 51-58.
[Rashevsky, N., 1965], “Models and Mathematical Principles in Biology”, in [Waterman, T. H. and Morowitz, H. J., 1965], pp. 36-53.
[Rashevsky, N., 1966a], “Physics, biology, and sociology : a reappraisal”, Bulletin of Mathematical Biophysics, vol. 28, 1966, pp. 283-308.
[Rashevsky, N., 1966b], “On mass behavior”, Bulletin of Mathematical Biophysics, vol. 28, 1966, pp. 465-475.
[Rashevsky, N., 1966c], “A sociological approach to biology”, Bulletin of Mathematical Biophysics, vol. 28, 1966, pp. 655-661.
[Rashevsky, N., 1968], “Neurocybernetics as a particular case of general regulatory mechanisms in biological and social organisms”, L’Age de la science, n°4, octobre-décembre 1968, Paris, Dunod, pp. 243-258.
[Rashevsky, N., 1968], Looking at History through Mathematics, The MIT Press, Cambridge, 1968, 199p.
[Raymond, P., 1975a], L’histoire et les sciences, Paris, François Maspero, collection « Algorithme », 1975, 93p.
[Raymond, P., 1975b], « Cinq questions sur l’histoire des mathématiques », Dialectiques, Automne 1975, n°10-11, pp. 93-107.
[Reffye (de), Ph. *et al*., 1996], Document préparatoire à la revue externe de l’Unité de modélisation des plantes, CIRAD, Montpellier, 1996, 180p.
[Reffye (de), Ph. et Essad, S., 1973], « Sur l’existence possible d’une unité naturelle de longueur des chromosomes métaphasique de *Lolium perenne L.* : le module », note de MM. Philippe de Reffye et Sadi Essad présentée, sous la spécialité « Cytogénétique », à la séance du 9 mai 1973 de l’Académie des Sciences de Paris par M. Roger Gautheret, Compte-Rendu de l’Académie des Sciences de Paris, t. 276 (9 mai 1973), série D, pages 2661 à 2664.
[Reffye (de), Ph. et Snoeck, J., 1976], « Modèle mathématique de base pour l’étude et la simulation de la croissance et de l’architecture du *Coffea Robusta* », Café, Cacao, Thé, Vol. 20, n° 1, pp. 11-31.
[Reffye (de), Ph. et Varenne, F., 2001], Entretien transcrit, 46p.
[Reffye (de), Ph., 1974a], « La recherche de l’optimum en amélioration des plantes et son application à une descendance F1 de *Coffea arabusta* », Café, Cacao, Thé, Vol. 18, n°3, pp. 167-178.
[Reffye (de), Ph., 1974b], « Le contrôle de la fructification et de ses anomalies chez les *Coffea arabica, robusta* et leurs hybrides ‘Arabusta’», Café, Cacao, Thé, Vol. 18, n°4, pp. 237-254.
[Reffye (de), Ph., 1975], Formulation mathématique des facteurs de la fertilité dans le genre *coffea*, Thèse de troisième cycle préparée avec M. Essad, soutenue à l’Université Paris-Sud Orsay, le 22 septembre 1975, devant les professeurs Demarly (président), Dattée et Kammacher.
[Reffye (de), Ph., 1976], « Modélisation et simulation de la verse du caféier, à l’aide de la théorie de la résistance des matériaux », Café, Cacao, Thé, Vol. 20, n°4, pp. 251-272.
[Reffye (de), Ph., 1979] Modélisation de l’architecture des arbres par des processus stochastiques. Simulation spatiale des modèles tropicaux sous l’effet de la pesanteur. Application au *Coffea Robusta*. Th. Doct. Etat, Université Paris-Sud, Orsay, France, 195p.

[Reffye (de), Ph., 1981a], « Modèle mathématique aléatoire et simulation de la croissance et de l'architecture du caféier *Robusta*. 1ère partie. Etude du fonctionnement des méristèmes et de la croissance des axes végétatifs », Café, Cacao, Thé, Vol. 25, n°2, pp. 83-104.

[Reffye (de), Ph., 1981b], « Modèle mathématique aléatoire et simulation de la croissance et de l'architecture du caféier *Robusta*. 2ème partie. Etude de la mortalité des méristèmes plagiotropes », Café, Cacao, Thé, Vol. 25, n°3, pp. 219-230.

[Reffye (de), Ph., 1982], « Modèle mathématique aléatoire et simulation de la croissance et de l'architecture du caféier *Robusta*. 3ème partie. Etude de la ramification sylleptique des rameaux primaires et de la ramification proleptique des rameaux secondaires », Café, Cacao, Thé, Vol. 26, n°2, pp. 77-96.

[Reffye (de), Ph., 1983], « Modèle mathématique aléatoire et simulation de la croissance et de l'architecture du caféier *Robusta*. 4ème partie. Programmation sur micro-ordinateur du tracé en trois dimensions de l'architecture d'un arbre », Café, Cacao, Thé, Vol. 27, n°1, pp. 3-20.

[Reffye (de), Ph., 1998], « Résumé du Colloquium de Rocquencourt », résumé étendu de la conférence du mardi 10 mars 1998 prononcée à l'INRIA de Rocquencourt, une page, accessible sur le site de l'INRIA à l'adresse http://inria.fr/colloques/COLLOQUIUM980310-fra.html.

[Reffye (de), Ph., Barthélémy, D., Blaise, F., Fourcaud, T. et Houllier F., 1997], « Essai sur la simulation des relations fonctionnelles entre architecture aérienne, architecture caulinaire et croissance en épaisseur des axes chez les végétaux »,Naturalia Monspeliensa, n°hors série, 1996 (sous presse en 01/96).

[Reffye (de), Ph., Blaise, F., 1993], « Modélisation de l'architecture des arbres. Applications forestières et paysagères », Revue Forestière Française, numéro spécial de 1993, vol. 45, « Informatique et foresterie », pp. 128-136.

[Reffye (de), Ph., Blaise, F., Chemouny, S., Jaffuel, S., Fourcaud, T., 1999], "Calibration of a hydraulic-based growth model of cotton plant", Agronomie, vol. 19, n°3/4, pp. 265-280.

[Reffye (de), Ph., Blaise, F., Fourcaud, T., Houllier, F. et Barthélémy, D., 1997], « Un modèle écophysiologique de la crosisance et de l'architecture des arbres et de leurs interactions », in [INRA-Grignon, 1997], pp. 129-135.

[Reffye (de), Ph., Blaise, F., Guédon, Y., 1993], « Modélisation et simulation de l'architecture et de la croissance des plantes », Revue du Palais de la Découverte, n°209, juin 1993, pp. 23-48.

[Reffye (de), Ph., Dinouard, P. et Barthélémy, D., 1991], « Modélisation et simulation de l'architecture de l'orme du Japon *Zelkova serrata* (Thunb.) Makino *(Ulmaceae)* : la notion d'axe de référence ». In Edelin, C. (éd.) 2ème Colloque International sur l'Arbre, 10-15 sept 1990, Montpellier, Naturalia Monspeliensa, n° hors série A7, pp. 251-266.

[Reffye (de), Ph., Dinouard, P. et Jaeger, M., 1990], « Basic concepts of computer plants growth simulation », in NICOGRAPH'90 Computer Graphics : "Where do we go now that we've arrived ?", Tokyo, pp. 219-234.

[Reffye (de), Ph., Edelin, C., Jaeger, M. et Cabart, C., 1986], « Simulation de l'architecture des arbres », in C. R. Colloque international sur l'arbre, Montpellier, 9-14 sept. 1985, Naturalia Monspeliensa, n°hors série, pp. 223-240.

[Reffye (de), Ph., Edelin, C., Jaeger, M., 1989], « Modélisation de la croissance des plantes », La Recherche, vol. 20, 1989, pp. 158-168.

[Reffye (de), Ph., Edelin, C., Françon, J., Jaeger, M., Puech, C., 1988], " Plants models faithful to botanical structure and development", Computer Graphics, vol. 22, n°4, pp. 151-158.

[Reffye (de), Ph., Elguero, E. et Costes, E., 1991], "Growth units construction in trees : a stochastic approach", Acta Biotheoretica, 39, pp. 325-342.

[Reffye (de), Ph., Goursat, M., Quadrat, J. P. et Hu, B. G., 2003], "The dynamic equations of the tree morphogenesis GreenLab Model", Plant Growth Modeling and Applications, Hu B. G. and Jaeger, M. eds, Proc. of 2003' International Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and their Applications (PMA03)" held at Beijing, China, October 2003, 2003, Hardcover, pp. 108-116.

[Reffye (de), Ph., Houllier, F., Blaise, F., Barthélémy, D., Dauzat, J. et Auclair, D., 1995], "A model simulating above and below ground tree architecture with agrofrorestry applications", Agroforestry Systems, vol. 30, n°1-2, 1995, pp. 175-197.

[Reffye (de), Ph., Parvais, J. P. et Lucas, P., 1978], « Influence des aléas de la pollinisation sur les rendements du cacaoyer – Modèle mathématique et simulation », Café, Cacao, Thé, Vol. 22, n°4, oct.-déc. 1978, pp. 251-271.

[Reffye (de), Ph., Parvais, J. P., Coulibaly, N. et Gervais, A., 1980], « Etude de la pollinisation du cacaoyer à partir du trafic des insectes – Modèle mathématique et simulation », Café, Cacao, Thé, Vol. 24, n°2, avril-juin 1980, pp. 83-100.

[Reichardt, W., 1965], "Nervous processing of sensory information", in [Waterman, T. H. and Morowitz, H. J., 1965], p. 344-370.

[Reichenbach, H., 1951], The Rise of Scientific Philosophy, Berkeley, University of California Press, 1951, 333p.

[Reinhardt, D, Kuhlemeier, C., 2002], "Plant architecture", EMBO Reports (European Molecular Biology Organization), vol. 3, n°9, 2002, pp. 846-851.

[Reinhardt, D., Mandel, T. et Kuhlemeier, C., 2000], "Auxin regulates the Initiation and Radial Position of Plant Lateral Organs", The Plant Cell, vol. 12, 2000, pp. 507-518.

[Reinhardt, D., Wittwer, F., Mandel, T. et Kuhlmeier, C., 1998], “Localized Upregulation of a New Expansin Gene Predicts the Site of Leaf Formation in the Tomato Meristem“, The Plant Cell, vol. 10, 1998, pp. 1427-1437.

[Renard, B., 1960], Le calcul électronique, Paris, PUF, QSJ, 128p.

[Renault, E., 2001], Hegel – La naturalisation de la dialectique, Paris, Vrin, 2001, 320p.

[Rescher, N., 1978], Scientific Progress, Basil Blackwell, 1978 ; traduction : Le progrès scientifique, Paris, PUF, 1993, 342p.

[Rescher, N., 2000], “Can Computers Overcome Our Limitations ?”, in [Konstanz/Pittsburgh, 2000], pp. 110-134.

[Resweber, J. P., 1981], La méthode interdisciplinaire, Paris, PUF, coll. « Croisées », 1981, 175p.

[RETV, 1995, vol. 50], Revue d’Ecologie (Terre et Vie), vol. 50, n°3, 1995, numéro entièrement consacré à la modélisation des écosystèmes forestiers.

[Rey, O., 2003], Itinéraire de l’égarement – Du rôle de la science dans l’absurdité contemporaine, Paris, Seuil, 2003, 333p.

[RFF, 1993, vol. 45], Revue Forestière Française, numéro spécial de 1993, vol. 45, « Informatique et foresterie ».

[RFF, 1995, vol. 47], Revue Forestière Française, numéro spécial de 1995, vol. 47, « Modélisation de la croissance des arbres forestiers et de la qualité des bois ».

[RHSH, 6, 2002], Mathématiques et sciences sociales au cours du 20ème siècle, n°6 de la Revue d’Histoire des Sciences Humaines, Presses universitaires du Septentrion, 6, 2002, 225p.

[Rickert, H., 1926, 1997], Kulturwissenschaft und Naturwissenschaft, J.C.B. Mohr (Paul Siebeck), 1926 ; Sciences de la culture et sciences de la nature, Paris, Gallimard, 1997, 294p.

[Ricœur, P., 1965, 2001], De l’interprétation – Essai sur Freud, Paris, Seuil, 1965 ; réédition : Paris, Seuil, coll. Points, 2001, 582p.

[Ricœur, P., 1975, 1997], La métaphore vive, Paris, Seuil, coll. L’ordre philosophique, 1975 ; réédition : Paris, Seuil, coll. Points, 1997, 414p.

[Ricœur, P., Azouvi, F. et de Launay, M., 1995], La critique et la conviction, Paris, 1995, Hachette-Littérature, coll. Pluriel, 289p.

[Rissik, A., 2000], “Men in the psychiatrist’s chair”, recension par Andrew Rissik de l’ouvrage d’Anthony Clare : *On Men : Masculinity in crisis*, Chattoo & Windus, London, 2000 ; parue dans The Guardian, Saturday August 12, 2000 ; accessible sur http://www.guardian.co.uk/Archive/Article/0,4273,4050515,00.html.

[Rivals, P., 1965], « Essai sur la croissance des arbres et sur leurs systèmes de floraison », Journée d’agriculture tropicale et de botanique appliquée (J.A.T.B.A.), vol. XII (12) déc. 1965, pp. 665-686; vol. XIII (1-2-3), janv.-mars 1966, pp. 91-122, vol. XVI, janv.-fév. 1967, pp. 67-102.

[Robert, R., 2001], « L’effet papillon n’existe plus ! », Pour la science, mai 2001, pp. 28-35.

[Robins, R. H., 1967, 1976], A Short History of Linguistics, London, Longmans, 1967 ; traduction : Brève histoire de la linguistique, Paris, Seuil, 1976, 253p.

[Rochebrune, 2003], Le statut épistémologique de la simulation, Actes des 10èmes journées de Rochebrune : rencontres interdisciplinaires sur les systèmes complexes naturels et artificiels, 26 janvier - 3 février 2003, Paris, Editions de l’Ecole Nationale Supérieure de Télécommunications de Paris (ENST), 2003, 313p.

[Roger, J. *et al.*, 1981], Actes du colloque R. A. Fisher et l’histoire de la génétique des populations (Paris 5-6 décembre 1980), J. Roger dir., Revue de Synthèse, Série générale, juillet-décembre 1981, 103-104, 470p.

[Roger, J., 1995], Pour une histoire des sciences à part entière (recueil posthume d’articles divers), Paris, Albin Michel, 1995, 476p.

[Rohrlich, F., 1990], “Computer Simulation in the Physical Sciences”, PSA (Philosophy of Science Association), 1990, vol. 2, pp. 507-518.

[Roll-Hansen, N., 1984], “E. S. Russel and J. H. Woodger : The Failure of Two Twentieth-Century Opponents of Mechanistic Biology”, Journal of the History of Biology, 1984, vol. 17, n°3, pp. 399-428.

[Room, P., 1997], “The Algorithmic Beauty of Plants”, recension de [Prusinkiewicz, P. et Lindenmayer, A., 1990] parue dans Endeavour, 1997, vol. 21, n°1, p. 41.

[Rose, J., 1978], Current Topics in Cybernetics and Systems, Proc. of the 4th Int. Congress of Cybernetics and Systems, August 21-25, 1978, Amsterdam, Netherlands, ed. by J. Rose, New York, Springer Verlag, 409p.

[Rosen, R., 1958a], “A relational theory of biological systems”, Bulletin of Mathematical Biophysics, vol. 20, 1958, pp. 245-260.

[Rosen, R., 1958b], “The representation of biological systems from the standpoint of the theory of categories”, Bulletin of Mathematical Biophysics, vol. 20, 1958, pp. 317-341.

[Rosen, R., 1968a], “On analogous systems”, Bulletin of Mathematical Biophysics, vol. 30, 1968, pp. 481-492.

[Rosen, R., 1968b], “Turing’s morphogens, two-factors systems and active transport”, Bulletin of Mathematical Biophysics, vol. 30, 1968, pp. 493-499.

[Rosen, R., 2000], Essays on Life Itself, New York, Columbia University Press, 2000, 361p.

[Rosenblueth, A. and Wiener, N., 1945], “The role of models in science”, Philosophy of Science, vol. 12, October 1945, n°4, 316-321.

[Rosental, C., 1998], « Histoire de la logique floue : une approche sociologique des pratiques de démonstration », Revue de synthèse, Tome 119, 4ème série, n°4, octobre-décembre 1998, pp. 575-602.

[Rosnay (de), J., 1975, 1998], Le macroscope – Vers une vision globale, Paris, Seuil, 1ère édition : 1975, réimpression en poche : 1998, 351p.

[Rosset, C., 1976, 1984], Le réel et son double, Paris, Gallimard, 1976 ; 2ème édition augmentée : Paris, Gallimard, 1984, Folio-essais, 131p.

[Rosset, C., 1977, 2004], Le réel – Traité de l'idiotie, Paris, Editions de Minuit, 1977 ; réédition : Paris, Editions de Minuit, coll. Reprise, 2004, 155p.

[Rosset, C., 1979], L'objet singulier, Paris, Editions de Minuit, 1979, 109p.

[Rougerie, G., 1967], La Côte-d'Ivoire, Paris, QSJ, 1967, 128p.

[Rousseau, B. et Rechenman, F., 1987], « Le projet EDORA. Vers un poste de travail informatique pour l'aide à la modélisation des systèmes dynamiques en biologie », in Biologie et Economie, éd. par J. Demongeot et P. Malgrange, Dijon, Librairie de l'Université de Bourgogne, 1987, pp. 203-221.

[Rozenberg, G. et Lindenmayer, A., 1972], "Develomental systems and language", *abstract* ; fiche de présentation en 2 pages avec résumé et références complètes de l'article originellement publié dans Proc. of the 4th Annual ACM Symposium on Theory of Computing, Denver, Colorado, 1972, pp. 214-221 ; fiche accessible sur le site de l'ACM : http://portal.acm.org/citation.cfm.

[Ruelle, D., 1991], Hasard et chaos, Paris, Odile Jacob, 1991, 245p.

[Ruse, M., 1975], "Woodger on Genetics – A Critical Evaluation", Acta Biotheoretica, 1975, vol. 24, n°1-2, pp. 1-13.

[Russo, F., 1972], Pour une bibliothèque scientifique, Paris, Seuil, 1972, 224p.

[Russo, F., 1983], Nature et méthode de l'histoire des sciences, Paris, Albert Blanchard, 1983, 503p.

[Ruyer, R., 1954], La cybernétique et l'origine de l'information, Paris, Flammarion, 1954, 237p.

[Sache, A., 1974], La théorie des graphes, Paris, PUF, QSJ, 1974, 128p.

[Sachs, T. et Novoplansky, A., 1995], "Tree form : Architectural models do not suffice", Israel Journal of Plant Sciences, 43, pp. 203-212.

[Sadoul, G., 1961], « La destruction massive des témoignages filmés », in L'histoire et ses méthodes, Paris, Gallimard, Pléiade, 1961, pp. 1167-1178.

[Saint-Sernin, B., 1995], La raison au XXème siècle, Paris, Seuil, 1995, 319p.

[Saint-Sernin, B., 2000], Whitehead - Un univers en essai, Paris, Vrin, coll. Analyse et philosophie, 2000, 208p.

[Salanskis, J. M. et Sinaceur, H., 1992], Le labyrinthe du continu, Colloque de Cerisy de 1991, Springer Verlag, 1992.

[Salanskis, J. M., 1998], Husserl, Paris, Les Belles Lettres, coll. « Figures du savoir », 1998, 119p.

[Salanskis, J. M., 2001], « Kant, la science et l'attitude scientifique », in [Fédi, L. et Salanskis, J. M., 2001], pp. 199-235.

[Salisbury, D., 1997], "Georges Forsythe, His Vision and Its Effects – Note in response to a query", Stanford News Service, 2 pages, November 26, 1997, http://www-db.stanford.edu/pub/voy/museum/ForsytheNews.html.

[Salomon, J. J., 1970], Science et politique, Paris, Seuil, coll. « Esprit », 1970, 406p.

[Samuelides, M., 1999], « Les réseaux neuronaux, une voie parallèle de l'intelligence artificielle », L'armement, n°67, septembre 1999, pp. 109-117.

[Sanders, L., 1992], Système de villes et synergétiques, Paris, Anthropos-Economica, 1992, 274p.

[Sanders, L., 2001], Modèles en analyse spatiale, collectif sous la direction de Léna Sanders, Paris, Hermès-Lavoisier, 2001, 333p.

[Sapir, E., 1949, 1967], Anthropologie 1- Culture et personnalité, Paris, Editions de Minuit, 1967, 209p, livre formé à partir d'articles extraits par Christian Baudelot des Selected Writings of Edward Sapir in Language, Culture and Personality, eux-mêmes collectés par David Mandelbaum, University Press of California, 1949.

[Sartre, J. P., 1946, 1996], L'existentialisme est un humanisme, Paris, Nagel, 1946 ; réédition : Paris, Gallimard, coll. Folio-Essais, 1996, 113p.

[Saugier, B., 1996], Végétation et Atmosphère, Paris, Flammarion, coll. Dominos, 1996,126p.

[Saurel, P., 1998], Nécessité des modèles en sciences cognitives : de la modélisation à la mise en parangon, Thèse soutenue à l'EHESS, 1998, 381p.

[Sauvan, J., 1966], « Méthode des modèles et connaissance analogique », Revue d'Agressologie, 7, 1, pp. 9-18.

[Scardigli, V., 2001], Un anthropologue chez les automates, Paris, PUF, « Sociologie d'aujourd'hui », 2001, 245p.

[Schaff, A., 1964, 1969, 1974], Langage et connaissance, paru en polonais en 1964 ; 1ère édition traduite : Paris, Anthropos, 1969 ; réimpression en Points/Anthropos, 1974, 251p.

[Schaff, J. et Loew, L. M., 1999], "The Virtual Cell", Pacific Symposium on Biocomputing, 4, pp. 228-239; disponible sur www.nrcam.uchc.edu/publications/vcell_publications.html .

[Schlanger, Jacques, 1983], L'activité théorique, Paris, Vrin, 1983, 134p.

[Schlanger, Judith, 1971, 1995], Les métaphores de l'organisme, Paris, Vrin, 1971 ; réimpression : L'Harmattan, Histoire des Sciences Humaines, 1995, 272p.
[Schlanger, Judith, 1983], L'invention intellectuelle, Paris, Fayard, 277p.
[Schmid, A. F., 1998], L'âge de l'épistémologie, Paris, Kimè, 1998, 289p.
[Schmidt, B., 2000], The Modeling of Human Behaviour, Ghent, SCS Int., 2000, 98p.
[Schmitt, B., 1984], « Biologie et mathématiques », Revue du Palais de la Découverte, 1984, vol. 12, n°119, pp. 21-26.
[Schmitt, S., 2000], Histoire du problème des parties répétées. De la morphologie idéaliste à la génétique du développement, Thèse de philosophie, Paris 7, préparée sous la direction de M. Morange, 2000, 708p.
[Schmitz, F., 1999], Wittgenstein, Paris, Belles Lettres, coll. Figures du savoir, 1999, 178p.
[Schrandt, R. G. et Ulam, S., 1970], "On recursively defined geometrical objects and patterns of growth", in [Burks, A. W., 1970], pp. 232-243.
[Schreider, E., 1960, 1967], La biométrie, Paris, PUF, QSJ, 1ère edition : 1960, 2ème edition : 1967, 128p.
[Schreiner, W., Neumann, M., Neumann, F., Roedler, S. M., End, A., Buxbaum, P., Müller, M. R. and Spieckerman, P., 1994], "The Branching Angles in Computer-generated Optimized Models of Arterial Trees", The Journal of General Physiology, vol. 103, June 1994, pp. 975-989.
[Schrödinger, E., 1986], What is life ?, Cambridge Univ. Press, 1945 ; traduction de Léon Keffler, préface d'A. Danchin, postface de C. Debru, Paris, Christian Bourgois, 1986.
[Schruben, L.W., 1980], "Establishing the credibility of simulations", Simulation, March 1980, pp. 101-105.
[Schüssler, I., 2003], Hegel et les rescendances de la métaphysique, Lausanne, Editions Payot-Lausanne, 2003, 355p.
[SCS Technical Committees, 1979], "Terminology for model credibility", Simulation, March 1979, pp. 103-104.
[Sebag, L., 1964, 1973], Marxisme et structuralisme, Paris, Payot, 1964 ; réimpression : Petite Bibliothèque Payot, 1973, 265p.
[Segal, J., 1998], Théorie de l'information : sciences, techniques et sociétés de la seconde guerre mondiale à l'aube du XXIème siècle, Thèse de doctorat, sous la direction de G. Ramunni, Université Lyon 2, 1998, disponible sur le site http://www.mpiwg-berlin.mpg.de/staff/segal/thesis/.
[Segal, J., 2003], Le zéro et le un – Histoire de la notion scientifique d'information au 20ème siècle, Paris, Syllepse, 2003, 890p.
[Selme, P., 1963], Le microscope électronique, Paris, PUF, QSJ, 1963, 128p.
[Séris, J. -P., 1994, 2000], La technique, Paris, PUF, 1ère édition : 1994, 1ère édition dans la collection PUF-Philosopher : 2000, 414p.
[Serres, M. et Latour, B., 1992, 1994], Eclaircissements, Paris, François Bourin, 1992 ; réédition : Champs-Flammarion, 1994, 299p.
[Serres, M., 1972], Hermès II – L'interférence, Paris, Minuit, 1972, 237p.
[Serres, M., 1974], Hermès III – La traduction, Paris, Minuit, 1974, 271p.
[Serres, M., 1981], Hermès V – Le passage du nord-ouest, Paris, Minuit, 1981, 197p.
[Serres, M., 1997], « Préface », in Le Trésor : dictionnaire des sciences, sous la direction de Michel Serres et Nayla Farouki, Flammarion, 1997, 1092p.
[Sève, L., 1998], Sciences et dialectiques de la nature, Paris, La Dispute, 1998, 419p.
[Sfez, L., 1988, 1992], Critique de la communication, Paris, Seuil, 1988, Points-Seuil, 1992, 527p.
[Shannon, R. E., 1998], "Introduction to the Art and Science of Simulation", in Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference, D. J. Medeiros, E. F. Watson, J. S. Carson and M. S. Manivannan, eds., pp. 7-14.
[Shapin, S. et Schaffer, S., 1985, 1989], Leviathan and the Air-Pump, Princeton University Press, 1985 ; réimpression avec corrections : 1989, 440p.
[Sheppard, C. W., 1969], "Computer simulation of stochastic processes through model-sampling (Monte-Carlo) techniques", FEBS Letters, Vol. 2, Supplement, March 1969, pp. S14- S21.
[Sicard, M., 1998], La fabrique du regard, Paris, Editions Odile Jacob, coll. Le champ médiologique, 1998, 275p.
[Silk, W. K. et Erickson, R. O., 1979], "Kinematics of Plant Growth", Journal of Theoretical Biology, 1979, vol. 76, pp. 481-501.
[Silva, E.A. et Clarke, K.C., 2002], "Calibration of the SLEUTH urban growth model for Lisbon and Porto, Portugal", in Computers, Environment and Urban Systems, 26, 2002, pp. 525-552.
[Simon, H. A., 1969, 1991], The Sciences of the Artificial, Cambridge, MIT Press, 1969, 2nd edition : 1981; traduction de la seconde édition complétée par J. L. Le Moigne : Sciences des systèmes – Sciences de l'artificiel, Paris, Dunod, 1991, 229p.
[Simon, J. C., 1998], « La reconnaissance des formes à l'épreuve des faits », in La Recherche, n°312, septembre 1998, reproduit sur le site Internet http://www.larecherche.fr .
[Simondon, G., 1958, 1969, 1989], Du mode d'existence des objets techniques, Paris, Aubier, 1ère édition : 1958, édition augmentée : 1989, 336p.

[Simulation, (année), (mois)], Simulation, revue fondée par John Mac Leod, soutenue par la Society for Compter Simulation (SCS), La Jolla, Californie, existant depuis 1952, dépouillée depuis 1971 jusqu'en 2002. Elle devient la revue Modeling & Simulation à partir de janvier 2002.

[Sitharama Iyengar, S., 1992], Structuring Biological Systems – A Computer Modeling Approach, Boca Raton – Ann Arbor – London –Tokyo, CRC Press, ed. By S. Sitharama Iyengar, 1992, 267p.

[Skellam, J. G., 1971], "Some philosophical aspects of mathematical modelling in empirical science with special reference to ecology", Mathematical models in ecology. The 12th symposium of the British Ecological Society, 23-24 march, 1971, J. N. R. Jeffers ed., Oxford, London, Edinburgh, Melbourne, Blackwell Scientific Publ., 1977, p. 27.

[Slobodkin, L. B., 1958], "Meta-models in theoretical ecology", Ecology, 1958, vol. 39, p. 3.

[Smith, A. R. et Heckbert, P., 2003], "A Brief History of the New York Institute of Technology Computer Graphics Lab", 4 pages, accessibles sur http://www-2.cs.cmu.edu~ph/nyit/masson/nyit.html.

[Smith, A. R., 1984], "Plants, Fractals, and Formal Languages", Computer Graphics, vol. 18 (3), July 1984, pp. 1-10.

[Snoeck, D., 1991], « Simulation de la croissance de cinq cultivars *Coffea Arabica* L. par l'analyse des cimes », Café, Cacao, Thé, Vol. 35, n°3, juil.-sept. 1991, pp. 177-190.

[Snoeck, J. et Reffye (de), Ph., 1980], « Influence des engrais sur l'architecture et la croissance du caféier Robusta », Café, Cacao, Thé, Vol. 24, n°4, oct.-déc. 1980, pp. 259-266.

[Sokal, A. et Bricmont, J., 1997], Impostures intellectuelles, Paris, Odile Jacob, 1997, 276p.

[Soler, C., Sillion, F., Blaise, F. et Reffye (de), Ph., 2001], "A physiological plant growth simulation engine based on accurate radiant energy transfer", Le Chesnay, rapport de recherche de l'INRIA, n°4116, février 2001, 32p., accessible à l'adresse http://w3imagis.imag.fr/Publications/2001/SSBD01/RR-4116.pdf.

[Soler, L., 2000], Introduction à l'épistémologie, Paris, Ellipses, 2000, 240p.

[Solignac, 1994], La biologie théorique à Solignac, 13 articles extraits de différents colloques tenus à Solignac et publiés sous la direction de H. Vérine, Paris, Polytechnica, 1994, 204p.

[Solignac-1982, 1983], Biologie théorique - Solignac 1982, Actes du deuxième séminaire de l'Ecole de Biologie Théorique du CNRS, Solignac, 20-22 septembre 1982, publiés sous la responsabilité de H. Le Guyader, Rouen, Publications de l'Université de Rouen, 1983, 483p.

[Solignac-1985, 1987], Biologie théorique – Solignac 1985, Actes du colloque de Solignac de 1985, sous la responsabilité de H. B. Lück, Paris, Editions du CNRS, 1987, 311p.

[Solignac-1986, 1988], Biologie théorique – Solignac 1986, Actes du colloque de Solignac de 1986, sous la responsabilité de A. Krettzschmar, Paris, Editions du CNRS, 1988, 429p.

[Sommerhoff, G., 1950], Analytical Biology, London, Oxford University Press, 208p.

[Sorensen, R. A., 1992], Thought Experiments, Oxford-New-York, Oxford University Press, 1992, 318p.

[Soustelle, M., 1990], Modélisation macroscopique des transformations physico-chimiques, Paris, Masson, 1990, 458p.

[Spengler, O., 1918-1922, 1947-1948], Der Untergang des Abendlandes, Vienne, 1917, édition définitive : 2 tomes, Munich, 1922 ; traduction : Le déclin de l'occident, 2 tomes, Paris, Gallimard, 1947, 413p. et 1948, 469p.

[Sperber, D., 1968, 1973], Qu'est-ce que le structuralisme ? 3. Le structuralisme en anthropologie ? Paris, Seuil, 1968 ; Points-Seuil, 1973, 125p.

[Stacy, R. W. and Waxman, B., 1965, 1969], Computers in Biomedical Research, New York, Academic Press, 3 vol. (vol. I : 1965, 562p. ; vol. II : 1965, 363p. ; vol. III : 1969, 288p).

[Stahl, W. R. et Cummerson, J. Y., 1967], "Systematic Allometry in Five Species of Adult Primates (Sytematic Allometry in Primates)", Growth, vol. 31, 1967, pp. 21-34.

[Stahl, W. R. et Goheen, H. E., 1963], "Molecular Algorithms", Journal of Theoretical Biology, vol. 5, 1963, pp. 266-287.

[Stahl, W. R., 1962], "Similarity and Dimensional Methods in Biology", Science, vol. 137 (July 1962), pp. 205-212.

[Stahl, W. R., 1965], "Algorithmically Unsolvable Problems for a Cell Automaton", Journal of Theoretical Biology, vol. 8, 1965, pp. 371-394.

[Stahl, W. R., 1967a], "Measures of Organization in a Model of Cellular Self-Reproduction Based on Turing-Machine", Proc. of the 5th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, vol. IV, ed. by L. LeCam and J. Neyman, Berkeley, University of California Press, 1967, pp. 581-607.

[Stahl, W. R., 1967b], "A Computer Model of Cellular Self-reproduction", Journal of Theoretical Biology, vol. 14, 1967, pp. 187-205.

[Stahl, W. R., 1967c], "The Role of Models in Theoretical Biology", Progress in Theoretical Biology, vol. 1, 1967, n°1, pp. 165-218.

[Stanley Jones, D. et K., 1960], The Kibernetics of natural systems, New York, Pergamon Press Ltd., 1960 ; traduction : La cybernétique des êtres vivants, Paris, Gauthier-Villars, 1962, 125p.

[Stein, P. R. et Ulam, S., 1964, 1970], “Nonlinear transformations studies on electronic computers”, 1ère impression dans les Rozprawy Matematyczne, Institut de Mathématique de l’Académie Polonaise, Varsovie, 1964 ; traduit et réimprimé *in* [Burks, A. W., 1970], pp. 244-263.

[Steiner, G., 1971, 2002], Extraterrritorial – Papers on Literature and the Language Revolution, New York, Atheneum, 1971; traduction : Extraterritorialité, Paris, Calmann-Lévy, 2002, 259p.

[Steiner, G., 1989, 1991, 1994], Real Presences. Is there anything *in* what we say ?, London, Faber and Faber, 1989 ; traduction : Réelles présences. Les arts du sens, Paris, Gallimard, 1991 ; réédition : Folio-essais, 1994, 283p.

[Stengers, I., 1987], D’une science à l’autre – des concepts nomades, collectif sous la direction d’Isabelle Stengers, Paris, Seuil, 1987, 392p.

[Stengers, I., 1993, 1995], L’invention des sciences modernes, Paris, La Découverte, 1993 ; Champs-Flammarion, 1995, 211p.

[Stengers, I., 1997], Cosmopolitiques VI – La vie et l’artifice : visages de l’émergence, La découverte/Les empêcheurs de penser en rond, Paris ; cf. particulièrement chapitre 5 : « l’art des modèles », pp. 100-124.

[Stevens, P. S., 1974], Patterns in Nature, Boston, Toronto, An Atlantic Press Book Little, Brown and Company, 240p.

[Stewart, I., 1997], Does God play Dice ? The new mathematics of chaos, Londres, Penguin Books, 1989, 1997: 2ème édition ; traduction : Dieu joue-t-il aux dés ?, Paris, Flammarion, 1992 et 1998, préface de B. Mandelbrot, 599p.

[Stöckler, M., 2000], “On Modeling and Simulations as Instruments for the Study of Complex System”, in [Konstanz/Pittsburgh, 2000], pp. 355-373.

[Sun, 1999], “Profile : Ivan Sutherland, Sun Fellow and VP of Sun Microsystems”, dossier d’une vingtaine de pages sur Ivan Sutherland, accessible sur le site de la société *Sun* à l’adresse http://www.sun.com/960710/feature3/ivan-profile.html.

[Suppes, P. *et al.*, 1973], Logic, Methodology and Philosophy of Science IV, Proc. of the 4th International Congress for Logic, Methodology and Philosophy of Science, Bucharest, 1971, ed. by P. Suppes, L. Henkin, A. Joja and G. R. C. Moisil, Amsterdam, North Holland Publishing Company, 1973.

[Suppes, P., 1981], Logique du probable, Paris, Flammarion, Nouvelle Bibliothèque Scientifique, 136p.

[Swinton, J., 2003],“Alan Turing and Morphogenesis”, mars 2003, http://www.swintons.net/jonathan/turing.htm.

[Taton, R., 1961, 1995], La science contemporaine, vol. 1 : le XIXème siècle, Paris, PUF, 1ère édition : 1961, édition Quadrige : 1995, 757p.

[Taton, R., 1964, 1995], La science contemporaine, vol. 2 : le XXème siècle – années 1900-1960, Paris, PUF, 1ère édition : 1964, édition Quadrige : 1995, 1072p.

[Teilhard de Chardin, P., 1955, 1990], Le phénomène humain, Paris, Seuil, 1955 ; France Loisirs, 1990, 343p.

[Teissier, G., 1936], « La description mathématique des faits biologiques », Revue de métaphysique et de morale, vol. 43, n°1, 1936, pp. 55-87.

[Teissier, G., 1937], Les lois quantitatives de la croissance, Paris, in Exposés de biométrie et de statistiques biologiques, 455, XI, rapport de l’Association des Physiologistes, 1937, 47p.

[Teissier, G., 1946], Matérialisme dialectique et biologie, Paris, Editions Sociales, 1946.

[Ten Dyke, R. P. et Kunz, J. C., 1989], “Object-Oriented Programming”, IBM Systems Journal, 1989, vol. 28, n°3, pp. 465-478.

[Theobald, D. W., 1968], An Introduction to the Philosophy of Science, London, Methuen & Co. Ltd., 1968, 145p.

[Thévenot, J., 1961], « Les machines parlantes », in L’histoire et ses méthodes, Paris, Gallimard, Pléiade, 1961.

[Thom, R., 1972, 1977], Stabilité structurelle et morphogenèse, W. A. Benjamin Inc., 1972 ; deuxième édition revue et augmentée : Paris, InterEditions, 351p.

[Thom, R., 1980], Paraboles et catastrophes, Milan, Il Saggiatore, 1980 ; version française : Flammarion, 1983, 189p.

[Thom, R., 1987], « Quantitatif et qualitatif en modélisation », in Biologie et Economie, éd. par J. Demongeot et P. Malgrange, Dijon, Librairie de l’Université de Bourgogne, 1987, pp. 15-22.

[Thom, R., 1988], Esquisse d’une sémiophysique, Paris, InterEditions, 1988, 285p.

[Thom, R., 1990], Apologie du logos, Paris, Hachette, 1990, 661p.

[Thom, R., Noël, E., 1991], Prédire n’est pas expliquer, entretiens avec Emile Noël, Paris, Flammarion, 1991, 175p.

[Thompson, d’Arcy (Sir), 1917, 1961, 1994], On Growth and Form, Cambridge University Press, 1917, nouv. éd., 1942, abrégée en 1961 par John Tyler Bonner ; traduction par Dominique Teyssié : Paris, Seuil, collection « Sources du savoir », 1994, 336p.

[Thompson, P., 1999], « Le rôle des modèles mathématiques dans la formalisation des systèmes auto-organisés », in [Feltz, 1999], pp. 421-438.

[Thuillier, P., 1969], « L’épistémologie des modèles est-elle bourgeoise ? », Atomes, n°269, vol. 24, octobre 1969, pp. 626-631.

[Tibon-Cornillot, M., 1986], « De la simulation du vivant à sa manipulation : approche contemporaine de l’origine biologique des techniques », in [Wolkowski, Z. B., 1986], pp. 159-178.

[Tibon-Cornillot, M., 1992], Les corps transfigurés – Mécanisation du vivant et imaginaire de la biologie, Paris, Seuil, coll. Science ouverte,1992, 318p.

[Tiercelin, C., 2002], Hilary Putnam, l'héritage pragmatiste, Paris, PUF, coll. Philosophies, 2002, 126p.

[Tinland, F., 1991], Systèmes naturels / Systèmes artificiels, collectif sous la dir. de F. Tinland, Paris, Champ-Vallon, coll. Milieux, 1991, 252p.

[Titli, A., 1979], Analyse et commande des systèmes complexes, Monographie AFCET, Division Automatique et Instrumentation, Toulouse, CEPADUES Editions, 237p.

[Tomassone, R. et Legay, J. M., 1999], « La biométrie, une discipline ouverte sur toutes les autres », Natures Sciences Sociétés, 1999, vol. 7, n°4, pp. 36-45.

[Tomassone, R., 1987], « Un essai de synthèse », synthèse du colloque « Modélisation et protection des plantes », Séance du 22 septembre 1987, C. R. Acad. Agric., Fr., 1987, 73, n°7, pp. 187-191.

[Tomassone, R., Dervin, C. et Masson J. P., 1993], Biométrie. Modélisation de phénomènes biologiques, Paris, Masson, 1993, 576p.

[Trefethen, F. N., 1954], "A history of operations research", in [Closkey, J.F.Mc et Trefethen, F.N., 1954, 1957], pp. 3-35.

[Treuil, J. P. et Mullon, C., 1996], « Expérimentation sur mondes artificiels : pour une réflexion méthodologique », in [CNRS, 1996], pp. 425-431.

[Turing, A. M. et Girard, J. Y., 1995], La machine de Turing, Paris, Seuil, 1995 : un recueil d'articles de Turing, traduits par J. Basch et P. Blanchard et commentés par J. Y. Girard. On y trouve notamment l'article de 1936: "On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem".

[Turing, A., 1952], "The chemical basis of morphogenesis", Philosophical Transactions of the Royal Society, B, 237, pp. 37-72.

[Ulam, S., 1951], "On the Monte-Carlo method", Proceedings of a Second Symposium on Large-Scale Digital Calculating Machinery, 1949, Harvard University Press, Cambridge, Mass., 1951, pp. 207-212.

[Ulam, S., 1952], "Random processes and transformations", Proceedings of the International Congress of Mathematicians, Cambridge, Mass., 1950, Amer. Math. Soc., Providence, R. I., 1952, pp. 264-275.

[Ulam, S., 1954], "Applications of Monte-Carlo methods to tactical games", Symposium on Monte-Carlo methods, University of Florida, 1954, New York, John Wiley and Sons, Inc. ; London, Chapman and Hall, Limited, 1956, p. 63.

[Ulam, S., 1957], "Infinite models in physics", Applied probability. Proceedings of Symposia in Applied Mathematics, Vol. VII, New York-Toronto-London, McGraw-Hill Book, Co., for the American Mathematical Society, Providence, R.I., 1957, pp. 87-95.

[Ulam, S., 1961], "Monte-Carlo calculations in problems of mathematical physics", Modern mathematics for the engineer : Second series, New York, McGraw-Hill, 1961, pp. 261-281.

[Ulam, S., 1962], "On some mathematical problems connected with patterns of growth of figures", Proceedings of Symposia in Applied Mathematics, 14, pp. 215-224, American Mathematical Society ; réédité dans [Burks, A. W., 1970], pp. 219-213.

[Ulam, S., 1966],"Patterns of growth of figure : Mathematical aspects", in G. Kepes, editor, Module, Proportion, Symmetry, Rhythm, pp. 64-74, New-York, Braziller, 1966.

[Ulam, S., 1976, 1991], Adventures of a Mathematician, Berkeley, University of California Press, 1976 ; réimpression augmentée d'une préface et d'une postface : 1991, 329p.

[Ulam, S., 1990], Analogies Between Analogies : the Mathematical Reports of S. M. Ulam and his Los Alamos Collaborators, Berkeley, University of California Press, 1990, 551p. ; accessible intégralement sur le site eScholarship Editions de University of California Press, http://ark.cdlib.org/ark:/13030/ft9g50091s/

[Ullmo, J., 1969], La pensée scientifique moderne, Paris, Flammarion, 1969, 315p.

[Vaihinger, H., 1911, 1935], Die Philosophie des « als ob », 1ère édition : Berlin, 1911 ; traduction de la 6ème édition : The Philosophy of « As If », London, Paul Kegan, 1935, 370p.

[Van Fraassen, B. C., 1989], Laws and Symmetry, Oxford, Oxford University Press, 1989 ; traduction par C. Chevalley : Lois et symétrie, Paris, Vrin, coll. Mathesis, 1994, 520p.

[Vanclay, J. K., 1995], "Growth models for tropical forests : a synthesis of models and methods", Forest Science, 41 (1)(1995), pp. 7-42.

[Vandendorpe, C., 1999], Du papyrus à l'hypertexte - Essai sur les mutations du texte et de la lecture, Paris, La Découverte, coll. Sciences et société, 1999, 271p.

[Varela, F. J., 1979, 1989], Principles of Biological Autonomy, New York, Elsevier - North Holland, 1979 ; traduction modifiée : Autonomie et connaissance, Paris, Seuil, 1989, 245p.

[Varenne, F., 2001], "What does a Computer Simulation Prove ? The Case of Plant Modeling at CIRAD (France)", in [ESS, 2001], p. 549-554.

[Varenne, F., 2003a], « La simulation conçue comme expérience concrète », Actes des 10èmes journées de rencontres interdisciplinaires sur les systèmes complexes naturels et artificiels (Rochebrune, janvier 2003) portant sur Le statut

épistémologique de la simulation, organisées par l'European Conference on Artificial Life (ECAL) et par l'Association pour la Recherche Cognitive (ARCO), éditions de l'Ecole Nationale des Télécommunications de Paris (ENST), pp. 299-313.

[Varenne, F., 2003b], « La simulation informatique face à la méthode des modèles », Natures Sciences Sociétés, vol. 11, 2003, n°1, pp. 16-28.

[Varenne, F., 2004a], « Bachelard avec la simulation informatique : nous faut-il reconduire sa critique de l'intuition ? », Actes du colloque « Confiance raisonnée et défiance rationnelle : la surveillance intellectuelle de soi à partir de l'œuvre de Bachelard », Université de Besançon, 12-13 décembre 2002, à paraître aux Presses Universitaires de Franche-Comté, coll. Annales littéraires, série Agon, 45p.

[Varenne, F., 2004b], « Nicholas Rashevsky (1899-1972) : de la biophysique à la biotopologie », Actes du Congrès National d'Histoire des Sciences et des Techniques (organisé par la Société Française d'Histoire des Sciences et des Techniques), Poitiers, 20-22 mai 2004, à paraître, 2p.

[Varenne, F., 2005a], « De la perte du réel au retour du sens commun », Natures Sciences Sociétés, à paraître en 2005.

[Varenne, F., 2005b], « Un aperçu sur la biologie théorique au 20ème siècle : le cas de la forme des plantes », Actes du 16ème Colloque Interdisciplinaire de Carcassonne, dont le thème était « Pour une éthique de la compréhension », organisé conjointement par l'Université Paul Sabatier et par l'ADREUC (Association pour le Développement des Rencontres et des Echanges Universitaires et Culturels), 2-4 juillet 2004, à paraître en 2005.

[Vendryès, P., 1942], Vie et probabilité, préface de Louis de Broglie, Paris, Albin Michel, collection « sciences d'aujourd'hui », 1942, 382p.

[Vendryès, P., 1981], L'autonomie du vivant, Paris, Maloine, coll. Recherches Interdisciplinaires, 1981, 149p.

[Vergnioux, A., 2003], L'explication dans les sciences, Bruxelles, De Boeck Université, 2003, 240p.

[Vérin, H., 1993], La gloire des ingénieurs – L'intelligence technique du XVIème au XVIIIème siècle, Paris, Albin Michel, 1993, 455p.

[Verley, X., 1998], Mach, un physicien philosophe, Paris, PUF, coll. Philosophies, 1998, 132p.

[Vermeersch, L. K. J. M., 1999], Neural Structure Characterization of Ill-defined Systems, San Diego, SCS Int., 1999, 254p.

[Vernadsky, W., 1926, 2002], La biosphère, publié en russe en 1926 ; traduction : Paris, Félix Alcan, 1929 ; réédition présentée par J. P. Deléage : Paris, Seuil-Points, 2002, 284p.

[Véron, J., 2002], « L'homme dénombré : arithmétique des populations », », Université de tous les savoirs – La géographie et le démographie – vol. 1, Paris, Poches Odile Jacob, 2002, pp. 31-48.

[Vessereau, A., 1947, 1960, 1988], Méthodes statistiques en biologie et agronomie, Paris, 1ère édition : 1947 ; deuxième édition : Paris, J. B. Baillière, 1960 ; réimpression : Paris, Lavoisier, 1988, 539p.

[Vessereau, A., 1947, 1992], La statistique, Paris, PUF, QSJ, 1ère édition : 1947 ; 18ème édition : 1992, 128p.

[Veyne, P., 1971], Comment on écrit l'histoire, Paris, Seuil, 1971 ; réédition du texte intégral, 1978, 438p.

[Viennot, L. et Debru, C., 2003], Enquête sur le concept de causalité, Paris, PUF/Science, histoire et société, 2003, 207p.

[Vignaux, G., 1991, 1994], Les sciences cognitives – Une introduction, Paris, La Découverte, 1991 ; réimpression : Livre de Poche, 1994, 351p.

[Vignaux, G., 2003], Du signe au virtuel – Les nouveaux chemins de l'intelligence, Paris, Seuil, 2003, 221p.

[Vinci (de), L., 1508-1518, 1942, 1987], Les carnets de Léonard de Vinci, Tome I, carnets de 1508-1518, traduction française d'une édition anglaise de 1906 : Paris, Gallimard, 1942 ; réimpression : Paris, Tel-Gallimard, 1987, 669p.

[Virilio, P., 1984], L'espace critique, Paris, Christian Bourgois, 191p.

[Vissac, B. et Deffontaines, J. P., 1999], « L'histoire du SAD – Pour une grille de lecture », Le Sadoscope, supplément au n°100, octobre-novembre 1999, pp. 1-4.

[Vitanyi, P.M.B., 1978], Lindenmayer systems : structure, languages and growth functions, Ph. D. Thesis, Amsterdam, 1978, 211p.

[Vogel, G. et Angermann, H., 1984, 1994], Atlas zur Biologie, DTV, Münich, 1984 ; traduction : Atlas de la biologie, Livre de Poche / La Pochotèque, 1994, 638p.

[Volterra, V., 1931], Leçons sur la théorie mathématique de la lutte pour la vie, Paris, Gauthier-Villars, 1931 ; réimpression : Paris, Editions Jacques Gabay, 1990, 214p.

[Vuillemin, J., 1955, 1987], Physique et métaphysique kantiennes, Paris, PUF, 1ère édition : 1955, 2ème édition : 1987, 363p.

[Waddington, C. H., 1962], New Patterns in Genetics and Development, New York, Columbia University Press, 1962.

[Wagensberg, J., 1985, 1997], Ideas sobre la complejidad del mundo, Barcelone, Tusquets Editores, 1985 ; traduction : L'âme de la méduse – Idées sur la complexité du monde, Paris, Seuil, 1997, 170p ; cf. particulièrement le chapitre 5 : « la simulation de la complexité », pp. 91-105.

[Wagner, P., 2002a], « Qu'est-ce que la théorie des modèles ? », in [Nouvel, P., 2002], pp. 7-28.

[Wagner, P., 2002b], Les philosophes et la science, collectif sous la direction de Pierre Wagner, Paris, Gallimard, Folio-essais inédit, 2002, 1124p.

[Waldrop, M., 2002], « Les origines de l'ordinateur personnel », Pour la science, mars 2002, n°293, pp. 10-15.

[Walliser, B., 1977], Systèmes et modèles – Introduction critique à l'analyse des systèmes, Paris, Seuil, 1977, 248p.
[Walliser, B., 1985], Anticipations, équilibres et rationalité économique, Paris, Calmann-Lévy, 1985, 252p.
[Walliser, B., 2000], L'économie cognitive, Paris, Odile Jacob, 2000, 258p.
[Walter, W. G., 1950], "An imitation of life", Scientific American, 182 (5), pp. 42-45.
[Walter, W. G., 1951], "A machine that learns", Scientific American, 51, pp. 60-63.
[Ward Bynum, T. and Moor, J. H., 1998, 2000], The Digital Phoenix – How Computers Are Changing Philosophy, ed. by T. Ward Bynum and J.H. Moor, 1st published: 1998, revised edition: 2000, Oxford, Blackwell Publishers Ltd, 414p.
[Wardlaw, C. W., 1968], Essays on Form in Plants, Manchester University Press, Machester, 1968, 399p.
[Waterman, T. H. and Morowitz, H. J., 1965], Theoretical and mathematical biology, New York –Toronto – London, Blaisdell Publishing Company, 1965, 427p.
[Watier, P., 2002], Une introduction à la sociologie compréhensive, Belfort, Circé, 2002, 182p.
[Watson, J. D., 1968, 2003], The Double Helix, sans lieu, Weidenfeld & Nicolson, 1968 ; traduction : Paris, Robert Laffont : La double hélice, 1968, réimpression : 2003, 215p.
[Weber, M., 1951, 1965, 1992], Essais sur la théorie de la science, Tübingen, publié en allemand en 1951 ; traduction : Paris, Plon, 1965 ; réimpression : Paris, Presses Pocket, 1992, 479p.
[Weeks, C. L. et Comfort, J. C., 1983], "The Growth Process of Tropical Trees : A Simulation with Graphic Output", Proc. of the 1983 Winter Simulation Conference, IEEE, Roberts, S., Banks, J. and Schmeiser, B. eds, pp. 649-657.
[Weisbuch, G., 1989], La dynamique des systèmes complexes – Une introduction aux réseaux d'automates, Paris, InterEditions/CNRS, 1989, 212p.
[Weyl, H., 1949, 1963], Philosophy of Mathematics and Natural Sciences, Princeton University Press (1949), reprinted by Athenaeum (1963), New York, 1963, 312p.
[Weyl, H., 1952, 1964], Symmetry, Princeton University Press, 1952 ; trad. : Symétrie et mathématique moderne, Paris, Flammarion, 1964 avec une préface de G. Th. Guilbaud, 153p.
[White, J., 1979], "The plant as a metapopulation", Ann. Rev. Ecol. Syst., 10, pp. 109-145.
[Whitehead, A. N. et Russell, B., 1910, 1962, 1970], Principia Mathematica to 56, London, Cambridge University Press, 1910 ; édition abrégée : 1962 ; réimpression de cette édition : 1970, 410p.
[Whitehead, A. N., 1929, 1995], Process and Reality, London, Macmillan Publishing, 1929 ; traduction : Procès et réalité – Essai de cosmologie, Paris, Gallimard NRF, 1995, 579p.
[Wiener, N., 1948, 1961], Cybernetics, or Control and Communications in the Animal and the Machine, New York, John Wiley, 1961 (1ère edition : 1948).
[Wiener, N., 1950, 1952], Cybernetics and Society, 1950, traduction : Cybernétique et société, Paris, Deux Rives, 1952 ; réédition synoptique (avec les remaniements de la version anglaise de 1954) : Paris, 10/18, 1971, 511p.
[Wilson, E. O., 1975], Sociobiology : The New Synthesis, Cambridge, Mass., Harvard University Press, 1975, 697p.
[Winnicott, D.W., 1971, 1975, 2002], Playing and Reality, (sans lieu), 1971 ; traduction : Jeu et réalité, Paris, Gallimard, 1975 ; réédition en Folio-essais, 2002, 277p.
[Winsberg, E., 2003], "Simulated Experiments : Methodology for a Virtual World", Philosophy of Science, 70 (January 2003), pp. 105-125.
[Witkowski, N., 1998], « D'Arcy Thompson fantôme de la biologie – Des outils mathématiques et physiques pour expliquer les formes du vivant », La Recherche, n°305, janvier 1998, pp. 27-30.
[Wittgenstein, L., 1922, 1961, 1990], Tractatus logico-philosophicus suivi des Investigations philosophiques, traduction de la version anglaise de 1922 (sans lieu) : Paris, Gallimard, 1961 ; réimpression : TEL-Gallimard, 1990, 365p.
[Wolff, E., 1963], Les chemins de la vie, Paris, Hermann, 1963, 239p.
[Wolfram, S., 2002], A New Kind of Science, Champaign, USA, Wolfram Media Inc., 2002, 1280p.
[Wolkowski, Z. W., 1986], Synergie et cohérence dans les systèmes biologiques, 3ème série, Compte-Rendu d'un séminaire transdisciplinaire au Centre Interuniversitaire Jussieu-St Bernard (Universités Pierre et Marie Curie et Paris VII) de novembre 1985 à juin 1986, sous la direction de Z . W. Wolkowski, Paris, ouvrage collectif ronéotypé.
[Woodger, J. H., 1937], The Axiomatic Method in Biology, London, Cambridge University Press, 1937, 174p.
[Wright, S., 1931], "Evolution in Mendelian Populations", Genetics, 1931, vol. 16, pp. 97-159.
[Wunenburger, J. J., 2003], Bachelard et l'épistémologie française, Paris, PUF, coll. débats philosophiques, 2003, 213p.
[Yan, H. P., Barczi, J. F., Reffye (de), Ph., Hu, B. G., Jaeger, M. et Le Roux, J., 2002], "Fast algorithms of plant computation based on substructure instances", Proc. of the 10th WSCG (Winter School of Computer Graphics), n°3, pp. 145-153.
[Yan, H. P., Reffye (de), Ph., Le Roux, J., Hu, B. G., 2003], "Study of Plant Growth Behaviors Simulated by the Functional-structural Plant Model --- GreenLab", Plant Growth Modeling and Applications, Hu B. G. and Jaeger, M. eds, Proc. of 2003' International Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and their Applications (PMA03)" held at Beijing, China, October 2003, 2003, Hardcover, pp. 118-125.

[Zamir, M., 1976], “The Role of Shear Forces in Arterial Branching”, The Journal of General Physiology, vol. 67, 1976, pp. 213-222.

[Zhan, Z. G., Reffye (de), Ph., Houllier, F. et Hu, B. G., 2003], “Fitting a Structural-Functional Model with Plant Architectural Data”, Plant Growth Modeling and Applications, Hu B. G. and Jaeger, M. eds, Proc. of 2003' International Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and their Applications (PMA03)" held at Beijing, China, October 2003, 2003, Hardcover, pp. 236-243.

[Zhao, X., Reffye (de), Ph., Barthélémy, D. et Hu, B. G., 2003], “Interactive Simulation of Plant Architecture Based on a Dual-Scale Automaton Model”, Plant Growth Modeling and Applications, Hu B. G. and Jaeger, M. eds, Proc. of 2003' International Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and their Applications (PMA03)" held at Beijing, China, October 2003, 2003, Hardcover, pp. 144-153.

[Zinc, G., 2000], L’ancien français, Paris, PUF, QSJ, 2000, 128p.

[Zobel, R. N., 2000], “A Personal History of Simulation in the UK and Europe, 1964-2001”, International Journal of Simulation, Systems, Sciences and Technology, vol. 1, n°1-2, December 2000, pp. 69-79, accessible sur http://ducati.doc.ntu.ac.uk/uksim/journal/issue-1/RichardZobel/RichardZobel.pdf.

ANNEXE A

Histoire de la modélisation : un état des lieux

Dans cette annexe, nous allons nous attacher à rappeler les principaux travaux qui ont déjà concerné l'histoire des modèles. Au passage, nous préciserons également la teneur de ce qui nous semble faire consensus au sujet de l'histoire de la naissance des modèles formels à la fin du 19ème siècle et au début du 20ème siècle. Ces travaux représentent un socle d'approches historiques antérieures sur lequel nous nous sommes souvent appuyé pour les périodes et les objets d'étude qui ne tombaient pas directement dans notre problématique. Ils nous ont également servi à décider, parfois par contraste, de l'esprit dans lequel nous devions procéder pour notre part.

Les différentes approches en histoire des modélisations

Avant tout, remarquons qu'il existe au moins quatre façons d'écrire l'histoire de la modélisation dans les sciences non-exactes, c'est-à-dire dans les sciences du vivant et de l'homme. Ces quatre approches coïncident naturellement chacune avec l'une des approches actuelles et relativement concurrentes ou complémentaires de l'histoire des sciences. Une première approche, souvent préférée par les historiens, consiste à se concentrer sur l'histoire administrative des programmes de recherche, des crédits, des laboratoires et des hommes. En ce qui concerne la modélisation, peu de travaux épousant cette perspective ont paru ; faute de recul, selon nous, mais aussi à cause de la difficulté qu'il y a à catégoriser les institutions scientifiques par la seule pratique de la modélisation. Cette pratique ne se définit pas en effet par le recouvrement d'un seul ou de quelques secteurs restreints de la science. Elle ne se définit donc pas par un objet d'étude bien identifiable. En outre, depuis une dizaine d'années, la modélisation a atteint la science dans son ensemble. Si, avec la modélisation, on n'a affaire qu'à une nouvelle technique théorique de mathématisation ou de calcul, elle peut en effet sans trop de dommages demeurer relativement transparente aux yeux de l'histoire institutionnelle du fait qu'elle brouille les cartes en transgressant les frontières. On comprendrait alors qu'une telle histoire ne fasse pas de la modélisation un objet d'étude séparé ou privilégié. Mais si, au contraire, cette pratique bouleverse effectivement la science dans son ensemble, en la réunifiant par exemple derrière des pratiques communes, l'histoire institutionnelle n'est pas non plus prête à s'engager sur ce point, mais cette fois-ci pour une autre raison : son actuelle réticence à embrasser des pans entiers de la science, voire à ressaisir le développement d'ensemble de la science. Nous ne voulons pas dire qu'une telle histoire synoptique serait immédiatement réalisable, mais seulement qu'elle serait souhaitable pour la compréhension historique des déploiements et des mises en œuvre progressives et différenciées des pratiques de modélisation. Quoi qu'il en soit, dans un cas comme dans l'autre l'histoire institutionnelle n'a pas encore réellement pris acte de l'émergence récente de la modélisation.

Une deuxième histoire des sciences, plus technique et davantage sectorisée, car produite le plus souvent par les scientifiques, se concentre sur la généalogie supposée relativement autonome et interne des productions scientifiques d'un champ donné. Ces productions, alors considérées comme des résultats plus ou moins cumulatifs, sont inscrites dans des filiations reconstruites *a posteriori* si nécessaire[1]. Qu'on le veuille ou non, c'est bien dans cet horizon-là que l'on retrouve la plupart des travaux historiques récents sur la modélisation, et cela dans la mesure où les scientifiques produisent nombre de récapitulatifs ou de mises en perspective visant à argumenter, problématiser, valoriser, enraciner ou simplement situer leurs propres apports. Même si cette approche est précieuse, une telle histoire est évidemment elle-même située et doit donc être à chaque fois vérifiée et relativisée au regard des sources primaires dont nous disposons par ailleurs. L'historienne des sciences américaine Sharon E. Kingsland a fortement insisté, et à juste titre selon nous, sur la nécessité de prendre en compte aujourd'hui l'utilisation que les scientifiques font de l'histoire de leur domaine[2]. L'histoire des sciences est désormais inséparable de l'histoire de ses révisions à travers les multiples historiques que produisent les scientifiques eux-mêmes pour des raisons essentiellement internes à leur propres pratiques argumentatives.

Or, précisons d'entrée qu'il ne nous sera de toute façon pas possible de dresser ici un état de la question telle qu'elle est traitée dans ces travaux de scientifiques. Nous devons nous justifier sur ce point. En effet, les occurrences de ces fragments d'histoire sont innombrables ; de plus, ces fragments sont très dispersés et relativement idiosyncrasiques car liés à la perception des chercheurs qui les produisent, à leurs formations, à leurs centres d'intérêt et enfin à la relative contingence de leur aisance littéraire au regard de la majorité silencieuse, sur ce point, de leurs collègues scientifiques. Cependant, nous récusons deux points de vue opposés et trop tranchés sur la valeur de tels essais. Ces deux points de vue témoignent l'un comme l'autre d'une mésestime du rôle tout à la fois informatif et stratégique de ces petits essais historiques intervenant au cœur des travaux techniques. D'une part, on peut, par excès de purisme selon nous, se rendre coupable de n'accepter comme valable que cette seule histoire intellectuelle des sciences, sous prétexte que ceux qui l'écrivent en sont les seuls véritables connaisseurs, à savoir les scientifiques eux-mêmes, tout autre historien risquant de se rendre victime d'une vision déformée et donc idéologisée par ses options philosophiques. Il n'y aurait de bonne histoire des sciences qu'écrite par les scientifiques spécialistes eux-mêmes. Si l'on peut certes légitimement contester l'objectivité comme la compétence de l'historien ou du philosophe, on n'en doit pas moins contester selon nous et en bonne logique celle du scientifique en matière d'histoire, faute de quoi on se rend coupable d'une surévaluation de principe qui nous paraît très difficile à justifier.

D'autre part, et à l'inverse, on peut se rendre coupable de négliger de tels travaux sous le prétexte que les scientifiques y seraient tout à la fois juges et partis. C'est ignorer un peu vite que de tels textes jouent un rôle dans la production et l'explicitation mêmes des résultats techniques. Si on veut les ignorer comment dès lors écrire une histoire des sciences ? Ce n'est pas le moindre des mérites de la sociologie des sciences de nous avoir fait apercevoir combien la rhétorique et un habile recrutement des pairs, *via* les bibliographies mais aussi *via* ces petits essais d'histoire des sciences, jouent un rôle d'importance y compris dans les travaux réputés les plus abstraits et formels[3]. Nous pouvons supposer, sans grands risques, que dans les champs moins formalisés

[1] Cette approche peut également rappeler, quoique très grossièrement, celle du philosophe Imre Lakatos. Ce dernier n'hésite pas en effet à prôner une reconstruction *a posteriori* des filiations techniques et intellectuelles : voir par exemple [Lakatos, I., 1978, 1986, 1994].

[2] Voir [Kingsland, S. E., 1985, 1995], pp. 235-236.

[3] On peut se référer à la tradition de décryptage sociologique de la logique telle qu'elle fut initiée, entre autres, par Jack Goody puis David Bloor, à la fin des années 1970. Sur le cas particulier de l'histoire de la logique floue, voir les travaux

des sciences de la vie et des sciences humaines, ces essais récapitulatifs jouent *a fortiori* un grand rôle dans la constitution même des pratiques techniques puisqu'ils servent notamment à argumenter le choix de certains formalismes par opposition à d'autres, jugés dépassés parce que censés appartenir à l'histoire.

Dans le même ordre d'idées, on pourrait nous objecter également que de tels historiques sont par principe aisés à balayer de la main pour le philosophe et l'historien, du fait qu'ils témoignent le plus souvent d'une philosophie des sciences rudimentaire et donc d'une incompréhension fondamentale des raisons et des processus qui animent véritablement la science dans son histoire[1]. C'est là encore se rendre coupable d'un procès d'intention qui nous paraît désormais injuste : à la différence peut-être de l'époque de Bachelard ou de celle de ses disciples, on ne peut plus aujourd'hui partir du principe que la philosophie spontanée des savants est prévisible, donc inutile à lire, car univoque ou trivialement bipolarisée[2]. Avec le développement de la modélisation, le polyphilosophisme que Bachelard voulait voir à l'œuvre mais de façon cachée (aux yeux des philosophes comme des scientifiques réfléchissant en philosophes sur leur discipline) dans les travaux des physiciens contemporains[3], est devenu monnaie courante en physique et dans diverses autres sciences. Ce polyphilosophisme se présente de façon souvent consciente, ouverte et sous la forme soit de micro-épistémologies locales et orientées, soit d'une polyméthodologie de principe assumée, quoique peut-être encore naïvement, par nombre de scientifiques[4]. Il règne en effet un relatif accord au sujet d'un des apports de la modélisation dans les sciences : le recours à des formalismes divers, dispersés, de moins en moins préférés par tradition interne au champ considéré mais de plus en plus par translation entre champs naguère hétérogènes[5]. La dispersion technique comme épistémologique de la méthode des modèles nous semble reconnue de manière assez large, dans le troisième quart du 20ème siècle. Ces travaux historiques ou récapitulatifs ne doivent donc pas être méprisés par principe, car c'est aussi en eux qu'une épistémologie, certes peut-être seulement inchoative, peut se laisser lire qui nous rendrait plus compréhensibles les évolutions rapides du monde scientifique contemporain.

Toutes ces raisons font qu'on ne peut se dispenser d'avoir recours à ces sources précieuses. Mais il faut bien garder à l'esprit que leur statut est à la frontière entre ce que l'historien nomme « source primaire » et « source secondaire » (voir les arguments de notre introduction générale). Ce serait une erreur selon nous de faire entrer de force ces essais d'histoire des sciences dans l'une ou l'autre seulement de ces deux catégories de sources. C'est

---

récents menés par Claude Rosenthal [Rosenthal, C., 1998]. Par ailleurs, la notion sociologique de « recrutement » est longuement thématisée dans [Latour, B., 1989, 1995].

[1] Michel Fichant indique ainsi que, dans une perspective bachelardienne, la philosophie des sciences propre aux scientifiques – philosophie tiraillée entre un empirisme grossier et un souci éthique hors de propos – ne les autorise pas à produire une épistémologie historique valable, [Fichant, M., 1973, 2000], p. 143.

[2] Selon l'interprétation unilinéaire d'Althusser (1967) par exemple, qui, dans la dynamique de la science, ne veut voir à l'œuvre que deux tendances antagonistes : le matérialisme et l'idéalisme.

[3] Voir [Bachelard, G., 1949, 1962], pp. 5-7.

[4] Voir, par exemple, les réflexions épistémologiques de valeur menées par Pierre Delattre sur un cas scientifique précis à partir du problème de la pluralité des modèles. Parlant de deux modèles d'interprétation de certaines maladies, il précise : « La difficulté [à conjoindre les deux modèles concurrents] vient essentiellement, à mon avis, d'une part des contextes épistémologiques différents dans lesquels nous nous sommes placés respectivement […], d'autre part des objectifs différents que nous avions. Pour des raisons pratiques – thérapeutiques – précises. E. Bernard-Weil devait élaborer un modèle qui 'colle' au plus près des données cliniques nombreuses qu'il avait relevées, avec toutes les contraintes que cela suppose. De mon côté, je n'avais pour objectif que de montrer la possibilité théorique du phénomène de régulation inverse, en me plaçant dans le cadre d'un formalisme cohérent et d'applicabilité assez large - celui des systèmes de transformations », [Delattre, P. et Thellier, M., 1979], Tome 1, p. 369.

[5] C'est par exemple en ces termes que le mathématicien et historien de la modélisation mathématique, Giorgio Israel décrit une des deux propriétés qui, selon lui, caractérisent la modélisation mathématique : « le renoncement à toute tentative d'aboutir à une image unifiée de la nature : un modèle mathématique est un fragment de mathématique appliqué à un fragment de réalité », [Israel, G., 1996], p. 11.

aussi pourquoi, pour couper court à ces difficultés dont nous avons conscience, nous avons bien sûr recours à elles, mais préférentiellement en contexte, c'est-à-dire lorsqu'il s'agit de restituer au plus près l'histoire du cas que nous avons choisi. Ce n'est que dans le contexte de la restitution historique elle-même que nous sommes à même de rectifier, si le besoin s'en fait sentir, de telles interprétations historiques. Nous nous refusons donc à tenter de brosser ici un tableau synoptique de l'histoire des sciences écrite par les scientifiques eux-mêmes, car nous ne serions pas d'emblée aptes à en percevoir les limites ni non plus à en exprimer par avance l'unité ou la diversité.

Une troisième histoire des sciences, plus philosophique car cherchant à se rendre compréhensible une certaine « logique de l'histoire »[1] tout en laissant place à la contingence, tente de ressaisir les conditions de possibilité tant historiques, contextuelles et sociales que techniques, épistémologiques et conceptuelles de la science en marche propre à une époque. D'elle dépend tout un ensemble de productions épistémologiques, particulièrement en France, dont nous étudierons en revanche ici de façon assez détaillée les positions successives et concurrentes au sujet des modèles (voir annexe B). L'épistémologie historique française, surtout depuis Georges Canguilhem, s'est en effet assez constamment intéressée au développement des modèles et des simulations. Nous verrons cependant que, malgré ses déclarations d'intention, il lui a en fait souvent manqué une réelle approche historique, comme une maîtrise exhaustive de certains corpus choisis, surtout en ce qui concerne la science contemporaine. Ces approches sont de ce fait trop souvent précipitées, ou nivelantes au regard de la complexité de l'histoire. Du point de vue de la méthode historique et de l'utilisation de l'histoire qui leur est propre, les philosophes des sciences anglo-saxons peuvent être, dans leur majorité, également rangés dans cette catégorie d'épistémologie historique. Ils procèdent par études de cas de façon à pouvoir exprimer une épistémologie personnelle sans toujours prendre la peine de resituer ces « cas » dans leur contexte institutionnel et intellectuel et sans toujours se laisser surprendre par les déroutes que, selon nous, l'histoire intellectuelle se doit de faire subir à toute préconception épistémologique hâtive, sans quoi elle risque bien de ne rien nous enseigner. Les sociologues des sciences ont alors eu beau jeu de critiquer cette méthode mais ils se sont souvent rendus coupables de pratiquer de la même façon en partant simplement d'autres *a priori* philosophiques : des *a priori* sociologistes que nous classerons aussi dans les *a priori* de type philosophique.

Dans un style nettement différent, plus proche d'une histoire épistémologique que d'une épistémologie historique, car privilégiant l'histoire intellectuelle et sociale tout en y mêlant, mais secondairement, des réflexions épistémologiques éparses, on retrouve, pour les domaines qui nous concernent, les travaux de Sharon E. Kingsland[2] et Giorgio Israel, notamment pour la modélisation dans les sciences de la vie, et ceux de Peter Galison pour la modélisation et la simulation en physique nucléaire[3]. C'est à de tels travaux que nous prêterons particulièrement attention dans cette annexe. Ils constituent le quatrième type d'histoire des sciences. C'est ce type d'histoire qui s'inscrirait plutôt sous la bannière d'une coexistence enfin pacifique entre une approche intellectualiste, du type de celle que la France avait connu avec Koyré[4], et une approche

[1] Ainsi, selon Georges Canguilhem, dans la perspective d'une épistémologie historique des sciences, il s'agit au contraire de faire prévaloir les « droits de la logique de l'histoire » sur les « droits de la logique », [Canguilhem, G., 1955], p. 5.

[2] Dans « Modeling Nature » [Kingsland, S. E., 1985, 1995], l'auteur retrace l'histoire de l'écologie des populations dans une approche centrée sur les principales figures qui l'ont illustrée et sur leurs apports respectifs.

[3] [Galison, P., 1997].

[4] Sur le conflit des approches à la fin du « règne » de Koyré, chez les philosophes et sociologues français intéressés à l'histoire des sciences et des idées, on peut consulter les articles réunis dans le numéro spécial de la *Revue de synthèse*

apparentée à l'histoire sociale des idées et des techniques. Délaissées par les philosophes, ce sont d'abord les historiens qui, en France, ont victorieusement pris le relais en ce domaine, notamment avec Jacques Roger et ses élèves. Cependant, ces travaux d'historiens ont rarement concerné l'époque et l'objet qui ici nous intéressent. Ce sont alors des scientifiques qui sont venus à leur tour, et progressivement, à cette approche. Cette quatrième forme d'histoire des sciences contemporaines, que l'on pourrait qualifier d'intégrative, a mobilisé des scientifiques venus après coup à l'histoire et elle a récemment vu la naissance de travaux d'importance. Or, c'est bien dans cette dernière perspective, celle d'une histoire épistémologique intégrative, mais aussi compréhensive, que nous souhaitons inscrire notre propre démarche. Mais comment allons-nous procéder pour cette revue des travaux existants ?

Plan de cet état des lieux

Dans un premier temps, nous rappellerons rapidement la teneur des accords relatifs entre historiens au sujet de l'émergence des modèles scientifiques avant l'apparition des modèles mathématiques. Cette émergence se perdant dans les origines débattues des pratiques techniques des hommes, ce n'est pas ici le lieu d'en proposer une lecture historique nouvelle. Cela passerait nos compétences comme le cadre limité de ce travail. Nous avons donc tâché de rappeler ce qui nous semblait faire consensus à nos yeux, dans cette histoire difficile mais déjà écrite par d'autres. Cette préhistoire des modèles nous est en fait apparue comme rapportée d'une façon assez uniforme par les différents historiens et philosophes qui s'en sont préoccupés. Sur ces origines semble en effet régner une sorte d'accord minimal que nous nous contenterons donc de rappeler, même si des questions de détail peuvent bien sûr, çà et là, être soulevées. Cependant, comme on le verra, cet exposé rapide ne sera pas sans conséquence. À l'occasion de ce rappel que nous voulons assez général, il nous sera en effet donné d'apercevoir par exemple déjà précisément l'origine et la teneur du malentendu qui règne entre la conception anglo-saxonne et germanique (voire autrichienne) des modèles, d'une part, et la conception plus spécifiquement française, d'autre part. Ce malentendu se maintiendra sous des formes à peine modifiées ; et il prospérera en déployant par la suite son ombre portée sur les interprétations divergentes qui seront données à la mathématisation croissante des modèles scientifiques au 20ème siècle. Dans un deuxième temps, nous procèderons à un rappel synthétique des divers acquis que l'on doit à différents historiens des sciences contemporaines, en particulier en histoire de la modélisation mathématique dans les sciences du vivant. Il nous apparaîtra que c'est l'histoire de cette modélisation en écologie, dynamique des populations, génétique et biométrie qui, en ce domaine, est la plus avancée. La raison en est simple : c'est surtout par ces biais que la méthode des modèles mathématiques est d'abord entrée dans les sciences de la vie. Les historiens des modèles se sont donc penchés préférentiellement sur ces disciplines. Quant à la modélisation de l'ontogenèse, elle a semblé s'imposer avec moins de force et plus de difficultés. L'histoire de la modélisation de la forme des plantes reste donc pour sa part un terrain relativement vierge.

Les modèles avant la modélisation mathématique

Pour certains anthropologues, il semble qu'une pratique cognitive des modèles ait toujours existé sous une forme ou sous une autre, à commencer par la pratique des images et des modèles

---

consacré à Henri Berr : [Biard, A., Bourel, D. et Brian, E., 1997], en particulier la contribution de Pietro Redondi, pp. 139-155.

réduits[1] et ce dès le développement d'une pensée mythique. Il est même des théories biologiques, neurobiologiques ou cognitives contemporaines qui caractérisent l'esprit par sa faculté essentielle à modéliser et à simuler le monde réel ou la vie mentale d'autrui[2]. La pratique des modèles serait ainsi consubstantielle à l'exercice de l'esprit humain et donc, *a fortiori,* inhérente à toute technique humaine. Sans vouloir rentrer dans ces débats scientifiques actuels qui ne nous concernent pas directement, précisons que, de leur côté, les historiens des sciences et des techniques s'accordent au moins sur un fait qui semble caractériser l'histoire des idées et des pratiques plus particulières de la modélisation dans la science occidentale : l'abstraction croissante de ses modèles au cours du temps. La préhistoire de ces modèles indique en effet que d'instruments techniques de test et de persuasion qu'ils furent d'abord, ils sont progressivement devenus des instruments scientifiques voire des objets théoriques[3]. Dans la culture occidentale, nous voyons poindre en effet cette tendance à l'abstraction, apparemment assez générale, et qui pousse aujourd'hui les modèles à n'être essentiellement que des modèles mathématiques. Comment, dans les études déjà existantes, a-t-on généralement interprété cette évolution ?

Comme le rappelle Suzanne Bachelard (1979), le terme « modèle » vient du latin *modulus*, *via* l'italien *modello,* qui désignait l'unité de mesure étalon servant à définir les rapports entre les dimensions des édifices architecturaux. De façon très générale, il désigne donc ce à quoi on se rapporte pour se représenter quelque chose. Dans ces conditions, le modèle peut être soit la chose visée à travers cette représentation (le modèle est alors normatif et est perçu dans son exemplarité insigne : le « *top-model* »), soit le résultat de l'acte de représentation, autrement dit le représentant nécessairement simplifié et altéré de l'objet représenté : le « modèle réduit ». Rappelons qu'il est extrêmement courant dans l'histoire des langues de voir ainsi se manifester, pour le même mot, des glissements de sens qui s'opèrent selon l'axe même de la métonymie[4]. Il ne faut donc point trop s'en étonner ici. Nous ne nous attarderons pas sur la question de savoir ce que peut signifier cette actuelle ambivalence dans le cas de la signification de notre terme « modèle », même si elle peut donner effectivement lieu à des problématisations poétiques ou philosophiques suggestives. Remarquons simplement que c'est la seconde signification qui finalement prédomine dans les techniques et les sciences, aux débuts de l'époque moderne. Le modèle devient synonyme de représentation simplifiée. Cela signifie d'abord qu'il peut être réalisé à une échelle différente de ce qu'il représente. Dans ce cas, les matériaux utilisés pour le modèle sont identiques ou tout au moins de qualité physiquement semblable à ceux dont est constitué ce qu'il représente. Le modèle est ainsi apparenté à une maquette : d'où l'expression « modèle

[1] Voir [Lévi-Strauss, C., 1962, 1985], p. 39 : « Autrement dit, la vertu intrinsèque du modèle réduit est qu'il compense la renonciation à des dimensions sensibles par l'acquisition de dimensions intelligibles. » On sait par ailleurs combien Claude Lévi-Strauss a su rendre plausible, avec son analyse du bricolage comme pensée scientifique « première » (*ibid*., p. 30) – exercée à l'aide d'images qui font signes sans être encore des concepts -, l'idée d'une anthropologie voire d'une préhistoire des sciences. Par ailleurs, le recours aux concepts de l'anthropologie des sciences en préhistoire des sciences fait l'objet d'un vif débat actuellement, débat dans lequel nous ne rentrerons pas. Voir, sur ce débat, [Keller, O., 1998].

[2] Voir [Monod, J., 1970b], p. 23 : « C'est le puissant développement et l'usage intensif de la fonction de simulation qui me paraissent caractériser les propriétés uniques du cerveau de l'homme […] Je ne crois pas en effet qu'il faille considérer les images non visuelles sur lesquelles opère la simulation comme des symboles, mais plutôt, si j'ose ainsi dire, comme la 'réalité' subjective et abstraite, directement offerte à l'expérience imaginaire. » Voir également [Jeannerod, M., 2002], chapitre VIII, pp. 141-167, intitulé « La simulation mentale ». L'approche de cet auteur insiste sur le fait qu'il y a chez l'homme moins d'empathie avec le non-biologique ou le non-humain qu'avec nos semblables. Le rapport empathique à autrui engagerait notre esprit dans une sorte de simulation de ses états mentaux par les nôtres.

[3] Nous ne nous prononcerons pas ici sur la question de savoir s'il y a eu rupture ou continuité dans cette préhistoire des modèles par rapport à la « mentalité primitive » - lecture discontinuiste de Lévy-Bruhl – ou par rapport à la « pensée sauvage ou mythique » - lecture continuiste de Lévi-Strauss.

[4] La métonymie est la figure de style par laquelle on désigne la partie par le tout, l'effet par la cause, etc. Sur la fréquence de tels glissements sémantiques dans l'évolution des langues, voir [Zinc, G., 2000].

réduit ». Chez les ingénieurs du 16ème siècle, il a alors la double fonction de persuader et de permettre des simulations, c'est-à-dire la « monstration des effets », selon l'expression d'Hélène Vérin[1]. Le modèle est là pour illustrer un argument ou pour remplacer un calcul par une mesure directe sur le modèle matériel, comme dans les actuelles souffleries. Aujourd'hui ce genre de modèle matériel existe donc encore et a explicitement pour fonction de pallier l'absence d'une méthode de résolution par arguments logiques ou mathématiques. C'est notamment le cas en hydro-dynamique où les équations de Navier-Stokes ne peuvent être analytiquement résolues.

La persistance de l'usage des modèles en science et technique confirme le diagnostic récent (1994) de l'historien des sciences Alistair Cameron Crombie au sujet des divers styles récurrents, depuis la Renaissance, qui animent la pensée scientifico-technique occidentale. Dans le cas de la modélisation, il s'agit du recours à un analogue matériel dans le but de mieux connaître l'objet modélisé. Remarquons que cela suppose de souscrire à ce que les anglo-saxons appellent le *maker's argument* : pouvoir produire et reproduire, c'est savoir. Or, pour Crombie, cette pratique récurrente de la modélisation témoignerait de la constitution d'un type de rationalité relativement indépendant des cinq autres types qu'il énumère par ailleurs[2] : la déduction à partir de principes, la logique du contrôle expérimental, la taxonomie, le calcul des chances en situation d'incertitude et la dérivation historique ou explication généalogique. Ainsi que le remarque Anne Fagot-Largeault, une telle présentation de la modélisation à l'intérieur du déploiement ramifié de la rationalité occidentale et de ses styles, au cours de son histoire, tend à asseoir aussi bien l'idée d'une incommensurabilité relative entre ces styles, déjà rendue populaire par Thomas Kuhn en son temps, que celle d'une possible cohabitation pacifique entre eux. Cette dernière idée nous paraît plus récente et originale. C'est l'occasion pour Crombie de préciser l'idée selon laquelle la rationalité occidentale, n'étant en elle-même ni uniforme ni univoque, pourrait donc être intrinsèquement, car constitutivement, disposée à accueillir les modes de construction et d'accréditation du savoir propres à d'autres civilisations ou à d'autres cultures. S'il nous faut bien évidemment suivre Crombie lorsqu'il constate l'ancienneté des pratiques de modélisation et leur récurrence, de proche en proche et par périodes, dans l'histoire des sciences, notre problématique, on le voit d'emblée, ne peut pourtant se satisfaire de ce seul constat, certes modeste et sans doute clairvoyant dans sa précision et sa rigueur historique. Car, si l'on se limite à affirmer que ces styles de démarche scientifique cohabitent et travaillent parfois à se compléter mutuellement, on ne s'autorise pas pour autant à penser la possible résorption de l'un en l'autre. Or ce type de résorption nous semble pourtant intervenir, notamment lorsque le modèle devient mathématique et qu'il n'est plus seulement matériel. En effet, nous faudrait-il alors situer la pratique contemporaine des modèles mathématiques dans la lignée du premier style (la déduction et la mathématisation), ou dans celle du deuxième (la logique du contrôle expérimental) ou bien encore dans celle du troisième (la modélisation analogique) ? N'est-ce pas finalement plutôt dans les trois ? Les ramifications de la rationalité occidentale dont parle Crombie donneraient donc parfois lieu à des bouclages, à des cas de fusions entre rameaux naguère autonomes. La perspective qui est la nôtre, de par le choix d'une problématique centrée sur la mathématisation croissante des sciences non-exactes au moyen des nouvelles formes de modélisation semblerait donc confirmer aussi bien que modifier quelque peu, pour la période récente, le diagnostic général de Crombie. Mais existe-t-il déjà quelque accord entre historiens au sujet des premières métamorphoses des modèles dans le passé des sciences ?

---

[1] [Vérin, H., 1993], p. 45.

[2] Pour ce passage, nous nous appuyons sur la synthèse rapide qu'en fait Anne Fagot-Largeault dans [Andler, D., Fagot-Largeault, A. et Saint-Sernin, B., 2002], pp. 162-164.

Les modèles mécaniques du vivant : identification physico-mécanique ou analogie structurelle ?

Ainsi que Canguilhem l'a noté[1], nombre des termes grecs de l'anatomie humaine et dont l'étymologie atteste l'antiquité sont en fait directement construits sur une identification mécanique et fonctionnelle entre organes vivants et objets techniques. Il est donc difficile de situer précisément, dans l'histoire des sciences, l'origine de cette pratique de l'analogie ou de l'identification entre objets de nature et objets de main d'homme : elle est probablement au moins contemporaine de la constitution même de la plupart des langues occidentales. Ce qui renverrait donc dans un passé bien plus ancien les racines de la modélisation que l'on veut voir souvent naître dans la Renaissance européenne. Quoi qu'il en soit, dans le cas particulier de la médecine, c'est bien dès l'Antiquité que le modèle rend tangible et visible de façon simplifiée le fonctionnement ou la structure d'un organe. Par la suite, dès le début du 17ème siècle, et avant même que le terme de « modèle » n'apparaisse dans une perspective explicite de connaissance et non plus seulement comme vague analogie fonctionnelle, l'usage de « modèle du vivant» au sens d'une identification d'un mécanisme à un organe, s'est énormément développé, et ce notamment dans le contexte de la philosophie mécaniste. Descartes, par exemple, reprenant les idées du médecin anglais Harvey, identifie le cœur à une pompe. Ces « modèles » mécaniques avant la lettre atteignent leur apogée avec Vaucanson. Mais, à la différence des modèles réduits des ingénieurs, ces modèles du vivant apportaient déjà avec eux une ambiguïté nouvelle et donc ouvraient la voie à des options philosophiques divergentes : fallait-il les considérer comme étant seulement structurés de façon analogue (identification structurelle ou analogie) ou comme étant matériellement semblables aux organes qu'ils représentaient (identification physico-mécanique) ? Autrement dit, ces modèles mécaniques étaient-ils mécanistes[2] ?

Cet usage du modèle mécanique pour le vivant n'était pas neutre en effet, puisqu'il semblait illustrer la thèse controversée d'une réduction du vivant au physico-mécanique. La même question peut d'ailleurs être posée en ce qui concerne les lois de l'optique géométrique « appliquées » au vivant si l'on remarque, avec Canguilhem, que la formation du concept de réflexe leur doit, avec Willis, la notion de « réflexion »[3]. À notre avis, l'ambiguïté inévitable et le caractère de manifeste ou tout au moins de représentation polémique de tout modèle du vivant, en ce sens précis, venaient notamment du fait qu'il n'était pas possible de fabriquer un modèle du vivant avec les mêmes matériaux que ceux dont est constitué ce qu'il représentait, à la différence du modèle réduit des ingénieurs, sauf à prendre un autre être vivant, mais que précisément on n'avait pas fabriqué ou « modelé », pour un « modèle » du premier. C'est d'ailleurs précisément ce dernier sens, plus tardif, que le mot modèle prendra, lorsque la biologie contemporaine désignera de ce terme la drosophile ou d'autres organismes parmi les plus simples à étudier. Quoi qu'il en soit, selon Jean-Claude Beaune[4], chez Vaucanson par exemple, le rôle simplement heuristique des automates était conscient et clairement attesté : il s'agissait de mieux faire voir et ainsi de mieux faire comprendre le fonctionnement de la vie animale. L'ambiguïté dont nous avons parlé est donc probablement aussi ancienne que cette pratique de l'analogie ou de l'identification entre objets de

[1] [Canguilhem, G., 1963, 1968], p. 306.
[2] Pour une analyse fouillée des transactions complexes entre mécanisme et vitalisme au cours du 17ème siècle, voir [Duchesneau, F., 1998].
[3] [Canguilhem, G., 1955].
[4] [Beaune, J.-C., 1979].

nature et objets de main d'homme : entre l'identification seulement structurelle et l'identification physico-mécanique, on ne peut dire que le choix ait toujours été conscient ni qu'il ait toujours été fait.

Il faut remarquer que, jusqu'au début du 20ème siècle, la science du vivant, malgré sa fascination pour les automates, n'avait pas su trancher entre l'approche de simple monstration et celle de démonstration rigoureuse. Certes les automates de Vaucanson avaient clos une période brillante, mais qui restera pour longtemps stérile : Vaucanson n'avait pu ni voulu fournir les outils de validation rigoureuse de ses analogies matérielles[1]. En effet, ainsi que l'explique Jean-Claude Beaune, dans l'esprit de Vaucanson et à son insu, magie transcendante et science se mêlaient encore trop : empreint de la tradition mythique et fasciné lui-même, il lui suffisait, en quelque sorte, d'attendre, sans en être bien conscient, que l'automate s'anime comme dans le mythe. Ainsi, dans cet état d'esprit, il lui aurait semblé peu pertinent de rechercher à affiner davantage, dans la rigueur et par la mesure laborieuse pour en concevoir une théorie, cette analogie déjà si patente entre le corps vivant et l'automate.

C'est en fait la physique qui développera de façon intensive la pratique des modèles, à la fin du 19ème siècle, avant d'inspirer assez rapidement la biologie en retour. Mais cet usage des modèles concrets en biologie se renouvellera dans la mesure même où la physique, précédant la biologie, a ouvert le savoir à des champs de phénomènes, donc à des champs d'analogies, nouveaux, dont plus particulièrement celui de l'électricité. Cela transparaît notamment dans l'histoire des différents modèles électriques du nerf tels qu'ils verront le jour à partir des travaux de Galvani[2].

Les modèles mécaniques en électrostatique, électromagnétisme et thermodynamique

Il existe une vaste littérature sur l'essor des modèles dans les sciences physiques. Nous pouvons renvoyer ici au travail de J. Dhombres et J.-B. Robert sur Fourier (1998), aux travaux de P. M. Harman sur Thomson, Faraday et Maxwell (1998), à ceux, déjà anciens, de R. Dugas sur Boltzmann (1959), à ceux de J. Bouveresse sur Boltzmann (1991, 2001), et à la plupart de ceux réunis par Morgan et Morrison (1999), ainsi qu'à leurs bibliographies.

Historiquement, il apparaît que les modèles se développent en physique à une époque où les savants se penchent sur de nouveaux phénomènes, rebelles à une réduction directe à la mécanique qui serait tout à la fois simple et immédiate. Or, il faut bien comprendre que, dans la physique du 19ème siècle, l'objectif principal de la modélisation a bien été d'emblée de se rendre accessibles des phénomènes jusque là mal maîtrisés parce qu'incomplètement théorisés. L'enjeu principal des modèles, en physique, est bien, dans ce contexte, d'accroître une maîtrise mathématique. Mais cette volonté de maîtrise mathématique est équivoque et n'est pas interprétée partout de la même manière : soit on pense que cette volonté commande simplement de se rendre à même de construire le formalisme mathématique adéquat, soit on considère que la détention de ce formalisme doit se doubler d'une maîtrise intellectuelle de la mathématique concernée, surtout si elle est nouvelle. Nous pensons que c'est principalement sur cette ambivalence interprétative largement due aux différences nationales entre la pratique de la « science » en France et celle des pays anglo-saxons (Angleterre, Etats-Unis principalement) que vont s'installer des malentendus entre historiens et épistémologues qui subsistent parfois aujourd'hui.

Ainsi, de façon compréhensible, certains historiens des sciences français veulent voir en Fourier l'un des premiers physiciens à avoir produit une modélisation au sens d'une modélisation

[1] [Beaune, J.-C., 1979].
[2] [Canguilhem, G., 1963, 1968].

mathématique. Si l'on accepte en effet de considérer que l'on a directement recours au modèle mathématique en science dès que l'on peine à se donner des phénomènes une représentation que l'on juge adéquate, on peut dire que c'est avec Joseph Fourier que la physique, après la mécanique, devient tout à la fois modélisante et mathématique. C'est bien sur ce point la thèse que soutiennent Jean Dhombres et Jean-Bernard Robert[1]. En effet, ce serait devant la question du transfert de la chaleur que la pratique moderne de la modélisation aurait fourbi des armes prometteuses et se serait développée efficacement, au sens où elle aurait réussi à introduire *directement* un outillage mathématique dans une discipline jusqu'alors rebelle à la prédiction précise car vouée aux « qualités secondes », selon la tradition philosophique[2].

Dans le cas de Fourier, on serait dès lors autorisé à dire que la difficulté de son entreprise l'aurait paradoxalement servi. En effet, en ce qui concerne les phénomènes qui intéressaient Fourier, rien ne se donne à *voir* de ce qui se trame dans la matière et lui fait communiquer sa chaleur. Pour produire une théorie de la communication de la chaleur, il faudrait donc inventer, se livrer à une construction imaginative purement mathématique. En supposant que l'on peut s'en tenir au seul problème de la communication de la chaleur, sans se laisser paralyser par la question de sa substance, Fourier montre en effet que l'on peut procéder par une « notion hypothétique de la communication de la chaleur », ainsi qu'il le dit lui-même[3]. Ce serait donc parce que Fourier aurait délibérément décidé de porter une attention plus soutenue aux relations fonctionnelles entre les phénomènes mesurables, aux processus, qu'à leur nature hypothétique, qu'il aurait ouvert la voie d'une physique pleinement mathématique.

Mais selon les historiens des sciences anglo-saxons, la modélisation n'aurait pas eu d'emblée pour seul objectif la mathématisation directe de phénomènes mal conçus à l'échelle microscopique. La naissance de la modélisation en physique serait ainsi moins due à une volonté de mathématiser directement, en s'émancipant des observables, qu'à une nécessité de saisir par la pensée ce qui se joue précisément *dans les outils mathématiques* que l'on manipule en pensée et qui s'avèrent en effet (et c'est là que les deux contextes techniques et scientifiques français comme anglais sont bien entendu communs) de plus en plus sophistiqués et complexes. C'est pourquoi une grande partie des historiens situent plutôt dans les travaux de Faraday, Helmholtz, Hertz, Thomson (Lord Kelvin), Maxwell et Boltzmann l'avènement progressif de la pratique contemporaine de la modélisation. Nous suivons de préférence cette lecture de l'histoire des sciences car, dans la perspective qui est la nôtre, nous choisissons délibérément de privilégier une approche particulièrement sensible aux problèmes communs auxquels une génération de scientifiques a pu se sentir nouvellement mais consciemment et explicitement confrontée. Il ne s'agit certainement pas pour nous de nier que Fourier ait eu recours à une façon nouvelle de mathématiser en physique, ce qui est possible, ni que cette façon ait par la suite servi d'idéal scientifique pour certains successeurs, mais seulement de tempérer l'approche rétrospective qui lui accorderait d'avoir été le premier promoteur de la modélisation mathématique avant même que le terme n'existe.

Dans cette perspective, c'est l'incontestable inflation du terme « *model* » dans les écrits des auteurs principalement anglo-saxons de la seconde moitié du 19ème siècle qui peut, à bon droit, nous donner le point de départ de cette nouvelle forme de pratique scientifique et ainsi nous poser

[1] [Dhombres, J. et Robert, J.-B., 1998].
[2] C'est encore par cette propriété de se prêter à une mathématisation directe – donc sans passage par une théorie - que Nicolas Bouleau caractérise la modélisation dans les sciences et les sciences de l'ingénieur. Voir [Bouleau, N., 1999], p. 320.
[3] [Dhombres, J. et Robert, J.-B., 1998], p. 472.

question. Suivant cette lecture, les physiciens anglais, ainsi que Boltzmann, certes stimulés par la réussite de Fourier, ont repris cet objectif de mathématisation pour les problèmes de l'électromagnétisme et de la théorie des gaz, mais tout en restant attachés à la possibilité d'exprimer et de se figurer concrètement ce que l'outil mathématique enveloppe. Maxwell[1], le premier, qualifie, « l'imagerie géométrique » des lignes de force inventée par Faraday de « modèle géométrique »[2]. Cette façon de procéder possède l'immense qualité, selon lui, de nous faire « obtenir des idées physiques sans théorie physique »[3]. Remarquons bien ici que le modèle, même s'il est explicitement qualifié de « géométrique », permet non pas tant d'abord de mathématiser un domaine physique nouveau que de se le représenter physiquement en l'absence (supposée temporaire) de théorie physique adéquate. Maxwell range d'ailleurs ce type de modèles (le « modèle géométrique ») parmi les « analogies physiques ». Voici sa définition : « par analogie physique, j'entends cette similitude partielle entre les lois d'une science et celles d'une autre, et qui fait que chacune des deux illustre l'autre »[4]. On le voit, cette citation souvent reprise par les épistémologues français[5], ne désigne pas aussi clairement qu'on l'aurait peut-être voulu une anticipation de ce que les mathématiciens appelleront plus tard un isomorphisme. Elle est en elle-même déjà porteuse d'ambiguïtés.

Par la suite, Maxwell justifiera aussi le recours à l'image des boules dures, infiniment élastiques et s'entrechoquant, pour expliquer le comportement des gaz. La physique statistique est donc un terrain de naissance privilégié pour les modèles scientifiques au sens contemporain. Mais il est une chose que l'on veut souvent ignorer : Maxwell tiendra à distinguer ce deuxième type d'« analogie physique » du premier, précisant en cela la distinction déjà opérée par Thomson entre « théorisation mathématique » et « théorisation physique »[6]. En effet, devant les lignes de force de Faraday, il faut seulement parler d'un « modèle géométrique », selon lui, autrement dit, d'une analogie essentiellement mathématique. On ne doit pas y prendre au sérieux ce recours à un domaine physique autre, pour illustrer celui qui nous occupe. C'est-à-dire que le physicien ne fait ici aucune hypothèse physique concernant l'existence supposée de quelques lignes de force que ce soit. La visée ici est bien précise et limitée. Ainsi la « fonction potentielle », par exemple, qui découle de cette lecture géométrique de Faraday n'est conçue, par Maxwell, que comme une « abstraction mathématique » qui permet de « clarifier nos conceptions » et « diriger notre attention » vers les propriétés réelles de l'espace[7]. Il ne faut donc pas la concevoir comme appartenant à une théorie physique à part entière, mais comme seulement destinée à ouvrir la voie à une théorie plus mature[8]. Au contraire, avec l'image des boules dures s'entrechoquant, le gaz fait l'objet d'une hypothèse physique au sens strict[9]. Les particules sont traitées comme si elles étaient approximativement des sphères dures. Le modèle vaut donc ici comme une approximation par laquelle on construit une « abstraction concrète » de la réalité, si l'on peut dire : « abstraction » parce qu'on idéalise et simplifie, « concrète » par ce que l'on se figure cette idéalisation sous une forme matérielle. Or, même si Maxwell exprime clairement la différence de statut entre les deux types d'analogie physique qui interviennent dans son œuvre, la confusion est

[1] Pour ces réflexions sur Maxwell, nous nous inspirons grandement des analyses très précises de [Harman, P. M., 1998].
[2] [Harman, P. M., 1998], p. 71.
[3] [Harman, P. M., 1998], p. 71.
[4] [Harman, P. M., 1998], p. 88.
[5] Notamment [Canguilhem, G., 1963, 1968], [Bachelard, S., 1979] et [Parrochia, D., 1990].
[6] [Harman, P. M., 1998], p. 79.
[7] [Harman, P. M., 1998], p. 73.
[8] [Harman, P. M., 1998], p. 88.
[9] [Harman, P. M., 1998], p. 92.

aisée. Elle a inévitablement été entretenue par la suite et cela peut expliquer pour une part les fameuses réticences de Pierre Duhem, un demi-siècle plus tard, à l'égard des modèles (voir Annexe B). Mais dans les deux cas de figure, l'« analogie physique », qu'elle soit stricte ou seulement mathématique, a pour fonction essentielle, chez Maxwell, de rendre les théorèmes mathématiques « plus intelligibles à nombre d'esprits » et ainsi plus aisément « applicables aux problèmes physiques »[1].

À titre de bilan provisoire, on peut déjà apercevoir que les pratiques de Faraday, Hertz, Thomson et Maxwell ont mis en évidence l'équivoque qui se fait jour dans la pratique de la modélisation en physique. À la fin du 19ème siècle, à l'instar de ce qui se passait déjà en biologie lorsque l'on avait recours à des modèles physiques, le statut épistémologique du modèle devient problématique dans la science physique elle-même. User d'un modèle mécanique, est-ce vouloir réduire tous les phénomènes physiques à la mécanique, discipline reine parce qu'entièrement mathématisée et donc porteuse d'un sens ontologique plus fondamental (modélisation réductionniste) ? Ou est-ce seulement illustrer une formulation mathématique tellement sophistiquée que l'on a perdu la possibilité d'une immédiate conception par l'entendement si bien qu'il faudrait la traduire en modèle pour la rendre intuitive à l'imagination (modélisation illustrative) ? A-t-on même besoin de rendre intuitive à l'imagination une formulation mathématique (modélisation figurative) ? C'est la question que posera Duhem. Et, cette illustration ne risque-t-elle pas d'être prise au premier degré, c'est-à-dire au sens d'une complète figuration, d'une présentation visualisable adéquate des phénomènes sous-jacents (modélisation idéologique) ? C'est la question originelle de Duhem, mais déplacée et reconduite, comme on le verra dans l'Annexe B, par Bachelard, Althusser, Badiou puis Canguilhem.

L'article « *Model* » de Boltzmann (1902)

Notons que, d'un point de vue historique, c'est l'article de l'*Encyclopedia Britannica* écrit par Boltzmann en 1902 qui rend publique, aux yeux des lecteurs cultivés, la généralisation de cette méthode dans les sciences physiques, même s'il n'est pas dépourvu d'ambiguïtés[2]. Nous allons toutefois tâcher d'en repérer ici la construction et les principaux arguments. Boltzmann y rappelle avant tout que le terme de « modèle » a d'abord désigné une représentation tangible construite réellement ou en pensée. Il poursuit son exposé par l'affirmation selon laquelle, malgré les réticences et le mépris que les sciences avaient fini par avoir pour ces monstrations sommaires et concrètes, et cela essentiellement à cause du succès des symboles et des écritures dans la science post-newtonienne, la nécessité de recourir aux modèles se ferait de nouveau particulièrement ressentir dans les sciences, en ce début de 20ème siècle. Cet article lui sert donc de tribune pour expliciter les mutations qu'il a pu constater ou qu'il voit venir dans la pratique scientifique. Il attribue ce renversement de tendance à l'augmentation considérable du volume des faits recueillis par la science au 19ème siècle. Un tel accroissement obligerait de façon inédite les savants à suivre scrupuleusement la règle visant à économiser les efforts consentis pour la compréhension ou saisie englobante de ces faits, et la traduction des uns dans les autres[3]. Le recours aux modèles nous permettrait donc de suivre cette règle d'économie de pensée,

[1] [Harman, P. M., 1998], p. 90.
[2] Nous remercions ici Girolamo Ramunni et Pierre Matarasso de nous avoir fait remarquer l'importance de cet article.
[3] Le texte dit exactement : "Yet as the facts of science increased in number, the greatest economy of effort had to be observed in comprehending them and in conveying them to others ; and the firm establishment of ocular demonstration was inevitable in view of its enormous superiority over purely abstract symbolism for the rapid and complete exhibition of complicated relations", [Boltzmann, L., 1902], p. 215.

popularisée auparavant par l'épistémologie d'Ernst Mach. Voici exactement dans quels termes Boltzmann justifie l'adaptation des modèles à cet objectif :

*« Et l'établissement ferme de démonstrations oculaires était inévitable eu égard à leur énorme supériorité par rapport au symbolisme purement abstrait car elles autorisent une rapide et complète exposition [*exhibition*] des relations compliquées. »*[1]

Le fait que Boltzmann confère une grande importance à l'exposition concrète de relations symboliques compliquées tient à sa théorie de la connaissance dont il a pris la peine de rappeler brièvement la teneur, au début de son article :

« Depuis longtemps déjà la philosophie a perçu que l'essence du processus de notre pensée tient dans le fait que nous attachons des attributs physiques particuliers – nos concepts – aux divers objets réels qui nous entourent et par le moyen desquels nous essayons de représenter les objets à notre esprit […] Selon cette perspective, nos pensées se tiennent à l'égard des choses dans un même rapport que les modèles aux objets qu'ils représentent. L'essence de ce processus est le rattachement d'un concept ayant un contenu défini à chaque chose, mais sans que cela implique une complète similitude entre la chose et la pensée ; parce que, naturellement, on ne peut connaître que très partiellement la ressemblance de nos pensées aux choses auxquelles nous les rattachons. »[2]

Boltzmann conçoit bien qu'une obscurité occasionnant de nouvelles réticences pourrait demeurer dans ses propos, notamment à cause de l'introduction de la notion assez vague de « ressemblance ». Il poursuit donc immédiatement, en recourant à une énumération d'analogies afin d'expliciter cette notion imprécise :

« Le type de ressemblance dépend ici de la nature de la connexion, la corrélation étant analogue à celle qui existe entre la pensée et le langage, le langage et l'écriture, les notes sur la portée et les sons musicaux, etc. Ici, bien sûr, la symbolisation de la chose est le point important, bien que la plus grande correspondance possible soit recherchée entre les deux quand cela est faisable, l'échelle musicale, par exemple, étant imitée par la position plus ou moins haute des notes sur la portée. Quand donc nous nous efforçons d'assister nos conceptions de l'espace par des chiffres, par les méthodes de la géométrie descriptive et par divers fils et objets modèles, notre topographie par des plans, des tableaux et des globes, et nos idées mécaniques et physiques par des modèles cinématiques, nous ne faisons qu'étendre et poursuivre le principe par le moyen duquel nous comprenons les objets dans notre pensée et nous les représentons dans le langage et l'écriture. C'est précisément de cette même manière que le microscope ou le télescope forme une continuation et une multiplication des lentilles de notre œil, et que le carnet de notes

[1] Argument à comparer avec ceux de Pierre Duhem dont il est question dans l'annexe B. Pour le texte intégral et originel de ce passage, voir la note précédente.

[2] "Long ago philosophy perceived the essence of our process of thought to lie in the fact that we attach to the various real objects around us particular physical attributes – our concepts – and by means of these to try to represent the objects to our minds […] On this view our thoughts stand to things in the same relation as models to the objects the represent. The essence of the process is the attachment of one concept having a definite content to each thing, but without implying complete similarity between thing and thought ; for naturally we can know but little of the resemblance of our thoughts to the things to which we attach them", [Boltzmann, L., 1902], pp. 213-214.

représente une extension externe du processus que la mémoire provoque par des moyens purement internes. »[1]

On voit donc que, par une espèce d'ironie, la définition de la ressemblance ne nous est pas donnée au niveau conceptuel mais que Boltzmann produit au contraire une énumération qui vaut comme monstration performative, en quelque sorte, de ce que cela peut signifier pour deux choses d'être ressemblantes. Il nous renvoie ainsi à des exemples divers de différents types de ressemblances qui sont donc eux-mêmes censés se ressembler pour donner consistance à la notion de ressemblance dans son unité. À nous de chercher à voir le point commun. En fait, il serait vain de croire en une définition unique de la ressemblance, voilà ce que veut dire et montrer ici Boltzmann. Il y a donc bien là en effet quelque chose comme la préfiguration d'un argument que l'on retrouvera bientôt chez Wittgenstein[2] et qui permettra de mettre en doute l'univocité des termes et la croyance en des significations subsistant hors de la mise en œuvre chaque fois particulière des mots dans des jeux de langage. Précisons même que cette doctrine de la ressemblance préfigure en un sens l'explication wittgensteinienne[3] de l'unité de l'idée par la notion vague mais pertinemment imagée d'« air de famille ». Les mots désignent des choses différentes qui entretiennent entre elles un air de famille mais qui n'est pas le même d'une ressemblance à l'autre. Autrement dit, la ressemblance est chaque fois de type différent. Mais cela n'empêche pourtant qu'on la perçoive. D'où l'impossibilité de principe de définir à un niveau général et valant dans tous les cas ce que signifie une ressemblance[4]. Toujours est-il que cette théorie de la connaissance permet à Boltzmann de rendre homogènes entre elles nos conceptions et nos

---

[1] "What resemblance there is lies principally in the nature of the connection, the correlation being analogous to that which obtains between thought and language, language and writing, the notes on the stave and musical sounds, &c. Here, of course, the symbolization of the thing is the important point, though, where feasible, the utmost possible correspondence is sought between the two – the musical scale, for example, being imitated by placing the notes higher or lower. When therefore, we endeavour to assist our conceptions of space by figures, by the methods of descriptive geometry, and by various thread and object models ; our topography by plans, charts and globes ; and our mechanical and physical ideas by kinematic models – we are simply extending and continuing the principle by means of which we comprehend objects in thought and represent them in language or writing. In precisely the same way the microscope or telescope forms a continuation and multiplication of the lenses of the eye ; and the notebook represents an external expansion of the same process which the memory brings about by purely internal means", [Boltzmann, L., 1902], p. 214.

[2] Comme l'a vu Jacques Bouveresse, *in* [Bouveresse, J., 1974, 1987], pp. 200-216 et [Bouveresse, J., 2001], *passim*.

[3] Cette idée sera davantage mise en lumière dans les *Investigations philosophiques*. Voir [Wittgenstein, L., 1922, 1961, 1990], § 67, p. 150 : « Je ne puis caractériser mieux ces analogies [entre les différents jeux que désigne le mot 'jeu'] que par le mot : 'ressemblances de famille' ; car c'est de la sorte que s'entrecroisent et s'enveloppent les unes sur les autres les différentes ressemblances qui existent entre les différents membres d'une famille ; la taille, les traits du visage, la couleur des yeux, la démarche, le tempérament, etc. – Et je disais : les 'jeux' constituent une famille. » Si la notion d'isomorphisme peut donc éventuellement valoir pour les concepts scientifiques chez le premier Wittgenstein, celui du *Tractatus*, il nous semble bien qu'elle est intenable chez le second Wittgenstein, celui des « Investigations », notamment pour les concepts philosophiques ou pour les concepts plus courants encore, c'est-à-dire en fait pour les concepts plus mal définis que ceux de la science. Il est significatif que, même dans cette seconde période, on retrouve les échos de textes boltzmanniens du type de celui que nous citons. L'épistémologie de Boltzmann nous paraît en avance sur celle du *Tractatus* et même sur celle des « Investigations » puisqu'elle relativise les concepts de la science eux-mêmes de la même façon que Wittgenstein le fera pour les seuls concepts philosophiques. En tout cas, grâce à la perspicacité de Wittgenstein, il nous apparaît rétrospectivement que ce texte de Boltzmann indique qu'on ne peut cantonner l'usage des représentations en science même à de purs isomorphismes qui seraient eux-mêmes entre eux isomorphes. Il serait faux de croire que l'on peut définir à l'avance les types de ressemblances et les faire se ressembler entre eux *a priori,* c'est-à-dire avant qu'on ait fait un usage scientifique et pratique de chacun d'eux. Cette question est celle même de la possibilité d'une épistémologie formaliste et générale. L'interprétation structuraliste, que fera Bourbaki, de la construction des modèles dans les sciences de la nature se montrera sur ce point très simpliste. Une telle lecture réductrice contribuera cependant au développement de l'approche typiquement mathématiste des sciences de la nature par nombres d'épistémologues français, et ce, jusqu'à nos jours. On n'a en effet encore rien dit en épistémologie des sciences mathématisées de la nature, quand on a dit qu'on y cherche, teste ou construit des structures (théories ou modèles) qui soient isomorphes à des structures mathématiques, que ces structures mathématiques soient d'ailleurs elles-mêmes préexistantes ou construites pour l'occasion, peu importe à cet égard.

[4] Et, par contre-coup, tous les mots et les concepts de la langue.

représentations matérielles : il n'y a pas lieu de les hiérarchiser puisque les unes sont les continuations des autres et que les concepts ne sont que des « attributs physiques particuliers »[1]. Davantage, il étend cette thèse de l'homogénéité des représentations internes et externes à ce qu'il appelle les « analogies arithmétiques » et dont il admet qu'elles ne sont pas à proprement parler des modèles mais dont il affirme qu'elles entretiennent avec le modèle, qu'il conçoit ici toujours simplement comme une « analogie spatiale concrète et en trois dimensions »[2], une relation de parallélisme.

En conséquence de cela, Boltzmann exhorte les scientifiques à suivre concurremment deux attitudes qui peuvent paraître, à première vue, contradictoires. Selon lui en effet, il faut d'une part qu'ils accroissent leur capacité à former des déductions à partir de prémisses purement formelles sans recours à des modèles tangibles. Et, d'autre part, ils doivent également faire en sorte que « les conceptions purement abstraites soient aidées par des modèles objectifs et compréhensifs dans les cas où l'on ne pourrait pas ni adéquatement ni directement traiter une grande masse de faits »[3]. La seconde exhortation n'est pas nouvelle, on le voit. Mais pour comprendre comment Boltzmann en vient à sa première exhortation, il convient de rappeler que la méthode déductive n'est pas à rejeter pour lui, au contraire. Cependant, elle ne doit pas être considérée comme analogue à ce qu'il appelle la « méthode euclidienne »[4] qui se fonde sur une croyance en des axiomes formels enracinés. Elle doit au contraire inciter à l'élaboration et à l'utilisation abstraite de théories ou d'images qui condensent de façon économique et utile les connaissances. Pour Boltzmann comme pour Mach, la croyance en un enracinement des formalismes n'est donc plus nécessaire. Les théories, elles aussi, sont des images, mais elles ont la particularité d'en englober et résumer certaines autres qui sont moins simples et moins économes en moyens représentatifs. Et c'est lorsque ces théories-images demeurent elles-mêmes difficiles à embrasser du regard de l'esprit qu'il faut avoir recours aux modèles qui sont eux-mêmes des images explicatives de ces images abstractives[5].

Dans les derniers paragraphes de son article, Boltzmann légitime enfin par un second argument cette nécessité d'un nouveau recours aux modèles[6]. Selon lui, pour comprendre cet argument, on doit se reporter à l'histoire de nos « conceptions de la nature » depuis Newton. Cette histoire a connu, selon lui, deux périodes majeures. Dans une première phase, la physique

---

[1] Sous l'influence explicite de Darwin, ce continuisme transparaît entre autres déjà dans un exposé de 1897 – *Über die Frage nach der objektiven Existenz der Vorgänge in der unbelebten Natur* (*Sur la question de l'existence objective des processus dans la nature inerte*) –, prononcé à l'Académie des Sciences de Vienne et cité par René Dugas : « La liaison intime entre les domaines psychiques et physiques est donné comme un fait d'expérience. Il est de ce fait hautement probable qu'à chaque processus psychique correspond dans le cerveau un processus matériel, qui lui est subordonné de façon univoque », [Dugas, R., 1959], p. 131. Boltzmann ajoute alors : « nous considérons le cerveau comme l'appareil, l'organe servant à la construction des *Weltbilder* [images du monde] », *ibid.*, p. 131.

[2] "a concrete spatial analogy in three dimensions", [Boltzmann, L., 1902], p. 214.

[3] "purely abstract conceptions should be helped by objective and comprehensive models in cases where the mass of matter cannot be adequately dealt with directly", [Boltzmann, L., 1902], p. 215.

[4] « Cette méthode part d'un nombre aussi réduit que possible de propositions, aussi évidentes que possible. Celles-ci étaient tenues dans l'ancien temps pour évidentes *a priori*, considérées comme données directement à l'esprit, et c'est pourquoi on les qualifiait d'axiomes […] Mais la force démonstrative de semblables considérations devait graduellement tomber en discrédit, le premier pas dans ce sens étant dû […] à ce qu'on était passé d'une base évidente *a priori* à un simple fondement garanti par l'expérience. On réalisa encore que les déductions à partir d'une telle base n'étaient possibles que moyennant de nombreuses hypothèses nouvelles, et enfin Hertz devait montrer que, nommément dans le domaine de la physique, notre conviction en la justesse d'une théorie conduit, dans tous les cas connus, à des conclusions exactes à l'égard des phénomènes. », *Über die Grundprinzipien und Grundgleichungen der Mechanik (1899)*, (*Sur les principes fondamentaux et les équations fondamentales de la mécanique*) cité par [Dugas, R., 1959], pp. 34-35.

[5] Comme on peut le voir, là est déjà en germe la position plus tardive de Nancy Cartwright (1983).

[6] Le premier argument s'étant contenté, comme nous l'avons dit précédemment, de constater l'expansion considérable des faits que la science doit désormais concevoir.

théorique « se donnait comme principal objet d'investigation la structure interne de la matière telle qu'elle existait réellement »[1]. Mais cette phase aurait vu sa fin devant les tentatives de théorisation des phénomènes électriques et magnétiques car elles conduisaient à des hypothèses « quelque peu artificielles et improbables »[2]. Cela a conduit Faraday puis Maxwell, qui a mis en forme les idées de Faraday et les a adoptées pour l'essentiel, à faire entrer la théorie physique dans cette seconde phase dans laquelle nous serions alors. En ce début de 20ème siècle, les atomes encore utilisés dans ces nouvelles théories ne sont plus à prendre au sens strict de points mathématiques exacts et aussi purs que des abstraits réellement existants. La véritable nature des constituants de la matière est délibérément considérée comme inconnue et les relations qui sont propres aux modèles qui les représentent ne sont considérées que « comme un processus ayant plus ou moins de ressemblance avec les fonctionnements de la nature, et représentant plus ou moins certains aspects qui les accompagnent »[3]. Pour Boltzmann, la théorie maxwellienne n'est donc qu'un moyen par lequel les phénomènes peuvent être reproduits d'une façon qui leur est similaire ; et, en tant que représentation, elle ne sert qu'à rapprocher d'une façon relativement uniforme des phénomènes empiriquement dispersés. Elle est une formalisation déracinée.

Après cette lecture suivie, formons donc un rapide bilan des idées générales de Boltzmann. D'après ses propos, toute mathématisation repose sur l'intuition, c'est-à-dire sur la faculté de recevoir ou suggérer des images. Ses réflexions sur l'outil mathématique qu'est l'équation différentielle, doublées d'une sensibilité à l'« intelligibilité » des lois mathématiques, ont fait de lui un promoteur de l'approche par analogie physique et par ce qu'il appelle les « images de pensée » (*Gedankenbilder*). Boltzmann a ainsi pu apparaître comme le défenseur d'un recours réductionniste aux modèles. Contre les énergétistes, Boltzmann tient en effet à soutenir que l'on ne peut penser clairement sans images. On peut bien combiner ces images, mais les combinaisons les plus claires pour l'esprit doivent être restreintes. En tout cas, elles doivent rester de nature finie afin qu'on puisse en discerner les éléments atomiques. Aussi, l'équation différentielle, avec ses infinitésimaux, n'est-elle pas la meilleure pourvoyeuse d'images ; loin s'en faut. Il faut donc tâcher de conserver le plus longtemps possible cet accès intellectuel à l'image qu'est le modèle fini d'un mécanisme analogue aux équations. En outre, pour Boltzmann, on ne doit pas oublier que les dérivés et les intégrales sont elles-mêmes des produits de l'approche mécaniste poussée à sa limite et non, à l'inverse, des êtres mathématiques plus nobles et antérieurs qu'il faudrait, dans le pire des cas, approcher par des modèles. C'est là une des conséquences de son approche finitiste et constructiviste en mathématiques[4]. Dans cette perspective, les équations sont donc logiquement secondes par rapport aux modèles finis. Ainsi s'explique leur fondamentale opacité pour notre esprit mais aussi le fait qu'elles exercent sur lui un pouvoir de fascination usurpé. Conformément à ce que nous montre notre lecture suivie de l'article de 1902, nous sommes fondés à suivre Jacques Bouveresse sur ce point lorsqu'il indique que le modélisme de Boltzmann est de type méthodologique et non ontologique[5]. À ce titre, Boltzmann a contribué de façon décisive à l'introduction d'une façon nouvelle de mathématiser la physique. Contre l'approche purement phénoménologique, il a soutenu que penser, y compris de façon

[1] "This first phase of theoretical physics may be called the direct one, in that it took as its principal object the investigation of the internal structure of matter as it actually exists", [Boltzmann, L., 1902], p. 217.
[2] "In explaining magnetic and electrical phenomena it inevitably fell into somewhat artificial and improbable hypotheses", [Boltzmann, L., 1902], p. 217.
[3] "a process having more or less resemblance to the workings of nature, and representing more or less exactly certain aspects incidental to them", [Boltzmann, L., 1902], pp. 217-218.
[4] Sur ce point, voir [Boltzmann, L., 1897], *passim*.
[5] Voir [Bouveresse, J., 1997] et [Bouveresse, J., 2001].

abstraite, nécessitait un recours à des modèles, qu'ils soient mécaniques ou d'une autre nature, dans la mesure où ceux-ci pouvaient être considérés comme une continuation de la pensée par d'autres moyens sensibles. Pour ce faire, il s'appuyait notamment sur l'utilisation que Maxwell avait fait des modèles mécaniques en électromagnétisme.

Cette interprétation se confirme pleinement, selon nous, si l'on s'aperçoit que, dans ses propres modèles à visée de clarification, Boltzmann peut avoir recours à un domaine d'intuition cette fois-ci sans rapport aucun avec le domaine intuitif physique correspondant. En effet, pour introduire son modèle mathématique du calcul des probabilités, en particulier, il utilise l'analogie du tirage de boules dans une urne ou bien celle des jeux de hasard. Ce faisant, il recourt à une façon manifestement nouvelle d'utiliser les mathématiques en physique ou, plus précisément, à une façon inédite d'utiliser des mathématiques nouvelles, le calcul des probabilités, pour modéliser des phénomènes physiques et cela de façon nettement fictive. Ainsi, il ouvre officiellement la voie à une forme de mathématisation purement descriptive telle qu'elle se développera fortement dans les méthodes statistiques appliquées à la biologie et, en particulier, en agronomie, au début du 20ème siècle. La modélisation statistique entendue en ce sens d'un scénario purement fictif pourra aisément, on le comprend, s'émanciper du seul territoire de la physique pour se transférer aux sciences non-exactes. La méthode des modèles statistiques rejoindra explicitement en cela les travaux, certes plus anciens, de démographie, d'anthropométrie ou de biométrie où le caractère fictif des construits formels n'était pas toujours clairement assumé.

Finalement, on peut qualifier le modélisme de Boltzmann de cognitif. Pour lui en effet, ce qui est important, c'est que notre pensée puisse se figurer ce qui se passe, peu importe que les choses se passent réellement ainsi. Sans doute même qu'on ne saura jamais se figurer ce qui se passe vraiment. Là n'est pas la question[1]. Point n'est besoin de croire en une essence mathématico-physique ultime et fondamental du monde physique. La pensée scientifique ne se sert pas du modèle pour désigner l'essence des choses mais pour en concevoir le plus clairement possible certains phénomènes.

Les travaux récents des historiens des sciences sur le développement des modèles

Après ces rappels généraux comme après ce commentaire très succinct de l'article de Boltzmann, nous sommes désormais à même de comprendre que la clé de la naissance de la méthode des modèles dans les sciences, au sens contemporain du terme « modèle », réside bien dans ce que nous appelons la conscience cette fois-ci bien nette d'un fort *déracinement des formalismes* à l'orée du 20ème siècle. Certains voient même de pures fictions dans les formalisations des sciences de la nature. D'autres sont plus circonspects et constatent qu'il y a différents degrés de fidélité au réel dans les modèles. Le modèle est alors conçu soit comme une aide à l'hypothèse réalistique, soit comme une aide à la conception par l'esprit humain de théories abstractives sinon purement formelles. Un consensus semble bien pourtant se dessiner autour de cette idée de *déracinement* : le modèle ne dit pas directement l'essence du phénomène. Il n'y est

[1] Boltzmann ne semble pas toutefois aller jusqu'aux extrémités auxquelles va le philosophe Hans Vaihinger dans son ouvrage intitulé *Philosophie du « comme si »* (*Philosophie des 'als ob'* - 1911). Vaihinger s'inspire lui aussi directement de Faraday. Mais il reproche à Maxwell sa timidité par rapport au caractère purement fictif des construits mathématiques en physique (voir [Vaihinger, H., 1911, 1935], Part II, §18, pp. 223. Vaihinger fait remonter l'histoire des « construits » fictifs en physique à Archimède. Ce dernier aurait ainsi conçu l'idée purement fictive, voire contradictoire, de « point fixe », c'est-à-dire de centre de gravité d'un solide ou d'un ensemble de solides (*ibid.*, pp. 224-225). Selon Vaihinger, cette idée sert à écourter considérablement les calculs (pour l'application des forces en l'occurrence) de manière à les rendre faisables. Elle est à la fois nécessaire et dépourvue de sens du point de vue d'un hypothétique référent dans la réalité.

plus enraciné. Il n'en est pas même abstrait. Au contraire, il est un « construit », né de la spontanéité de l'esprit humain. Mais ce construit est ambivalent car il peut encore se voir prêter différents objectifs en fonction des ontologies de chacun, d'où les désaccords entre les physiciens eux-mêmes à la fin du 19ème siècle. On peut déjà l'anticiper : cette ambivalence va elle-même être transférée et transformée en même temps que ces nouvelles méthodes formelles de la physique seront transférées aux autres sciences. Le malentendu pourra ensuite s'étendre aux philosophies des sciences, comme nous aurons l'occasion de l'évoquer dans l'annexe B.

Mais il existe déjà un certain nombre de travaux historiques sur les transferts et les développements des techniques de modélisation mathématique dans les sciences de la vie. Ici, nous allons donc plus particulièrement rappeler les acquis des historiens des sciences en matière d'histoire de la modélisation, en particulier dans les sciences de la vie et de l'environnement, mais aussi en ce qui concerne l'histoire de la simulation en physique (puisqu'à part quelques articles, on ne trouve pas encore d'histoires de la simulation numérique ou informatique dans les sciences de la vie).

Sharon E. Kingsland

C'est en 1985 que l'historienne des sciences américaine Sharon E. Kingsland publie la première étude historique d'ensemble sur la naissance des modèles mathématiques en écologie des populations, principalement en écologie animale. Ce travail analyse patiemment, à un niveau tout à la fois technique, conceptuel et pratique, les débuts des tentatives de représentation mathématique appliquées à la croissance des populations, à la prédation et à la compétition. Une place moindre y est faite au contexte social et intellectuel. Pour restituer cette histoire, l'auteur a ainsi choisi de suivre chronologiquement, et assez individuellement, chacun des principaux acteurs du domaine dans l'ordre de leurs interventions respectives sur la scène scientifique. Cet ouvrage constitue donc davantage l'exposé de différentes « séries d'épisodes »[1], comme le concède l'auteur, qu'une histoire complète de l'écologie des populations. Or, même si le domaine de l'écologie des populations ne recouvre pas celui de la botanique et de la croissance des plantes, la proximité de ces travaux, dans le temps, dans leurs objets et dans leurs méthodes, avec ceux qui nous intéressent, nous commande d'examiner de près ce que cet auteur nous y apprend de l'émergence de la modélisation mathématique.

Tout d'abord, Sharon E. Kingsland rappelle combien, au début du 20ème siècle, les écologues étaient davantage portés sur le travail en champ et en laboratoire. Moins versés dans la formalisation mathématique et très sceptiques à son égard, ils furent donc d'abord distancés par des chercheurs venus des sciences physiques et des sciences humaines, comme la démographie. Dès le début, leur argument critique le plus fréquent à l'encontre de la mathématisation était celui de la simplification outrancière et inacceptable que l'introduction des mathématiques commandait. Dans les années 1920, pour nombre d'écologues et de naturalistes, il ne semblait toujours pas possible de capturer et de faire tenir dans des équations la complexité du monde vivant réel[2]. Les modèles avaient alors le plus souvent la forme d'équations différentielles ou de systèmes d'équations différentielles. Les variables représentaient les effectifs respectifs des espèces ou des classes d'âges. Or, afin de pouvoir utiliser ce type de modèles, l'écologie des populations faisait en effet plusieurs hypothèses restrictives qui pouvaient d'ailleurs servir à dessiner le contour de ce domaine scientifique, avant qu'il ne vienne, plus tard, interférer et se confondre avec la génétique

[1] [Kingsland, S. E., 1985, 1995], p. 6.
[2] [Kingsland, S. E., 1985, 1995], p. 2.

des populations pour former la dynamique des populations : d'une part, les populations étaient supposées ne pas varier génétiquement. D'autre part, l'environnement physique aussi était supposé demeurer le même[1]. Ces modèles étaient donc, pourrait-on dire, assez peu dynamiques : ils n'affectaient de dynamique qu'aux variables jugées intéressantes. Néanmoins, certains écologues ont peu à peu surmonté leur méfiance première et ils eurent l'envie de tester expérimentalement ces modèles. Sharon E. Kingsland raconte alors précisément comment ces premiers modélisateurs en écologie des populations ont dû apprendre à intégrer de façon inédite les approches de terrain, les expérimentations et les approches théoriques. On peut dire ainsi qu'au milieu des années 1940, il existait déjà une « communauté vivante d'écologues des populations en écologie »[2]. Ce fut bien sûr surtout le cas aux Etats-Unis.

Dans les années d'après-guerre, l'écologie des populations commença à admettre qu'elle ne trouverait pas de lois simples du type de celles que l'on voit apparaître en physique. Les modèles se sont alors sophistiqués, mais surtout le recours à des analyses de données systématiques s'est intensifié et cela grâce aux premiers développements de l'ordinateur. L'ordre du jour était surtout à la prise en compte de la complexité retrouvée des phénomènes écologiques. Les écologues apprirent alors davantage de mathématiques et ils eurent directement recours à des collègues mathématiciens pour qu'ils les initient à d'autres mathématiques que celles des systèmes d'équations différentielles[3]. Ces autres styles de mathématiques appliquées et descriptives s'étaient eux-mêmes développés durant la guerre et dans l'immédiate après-guerre. Ce fut notamment le cas de la recherche opérationnelle qui visait la mise en équations et la modélisation prédictive du comportement complexe de systèmes mixtes : hommes et machines, hommes et institutions, hommes et administrations. La théorie des systèmes de Ludwig von Bertalanffy, développée avant-guerre, commençait également à avoir du crédit, comme d'abord en biologie et en physiologie. Le holisme que prônait déjà Alfred Lotka dans les années 1920 rencontrait alors plus d'adeptes. La théorie de l'information de Claude Shannon et Warren Weaver se développait et semblait applicable dans divers domaines hétérogènes. La théorie des jeux enfin, ainsi que la programmation mathématique, empruntées pour leur part à l'économie, semblaient pouvoir fournir d'autres formalismes mathématiques à l'écologie. Tous ces nouveaux styles disponibles, ainsi que le développement des modèles d'analyse de données, faisaient souffler un vent de liberté qui annonçait un assouplissement de l'outil mathématique et donc sa possible prise en compte de la complexité du vivant. En dynamique des populations, les modèles devinrent alors de plus en plus réalistes et détaillés, leurs performances dépendant toujours davantage de celles des ordinateurs disponibles. La recherche de capacités prédictives accrues était en effet favorisée par la demande sociale, émanant elle-même d'une prise de conscience et d'une prise en compte générale puis institutionnelle de diverses menaces écologiques d'envergure. Aux Etats-Unis, à la fin des années 1960, des programmes de recherche au niveau national apparaissent alors qui valorisent spécifiquement la prédiction écologique[4].

C'est à cette époque de forte expansion de la dynamique des populations de type immédiatement opérationnelle et pragmatique, pourrions-nous dire, qu'une approche mathématique alternative commence à prendre son essor, notamment en la personne de Robert H. MacArthur : « ses modèles étaient plus généraux : ils ne donnaient pas de prédictions

[1] [Kingsland, S. E., 1985, 1995], p. 1.
[2] [Kingsland, S. E., 1985, 1995], p. 2.
[3] [Kingsland, S. E., 1985, 1995], p. 3.
[4] [Kingsland, S. E., 1985, 1995], p. 3.

numériques, mais distinguaient différentes alternatives seulement en un sens qualitatif »[1]. Cette scission entre modèles empiriques et modèles théoriques en écologie rejoignait alors une partition de même type, déjà à l'œuvre depuis les années 1930, en économie. Les travaux de MacArthur ont mené à des controverses dont il est possible aujourd'hui, selon Sharon E. Kingsland, d'interpréter l'interrogation sous-jacente et commune: « où se trouve le juste équilibre entre une vision mathématique du monde et la vision plus focalisée de l'écologue qui étudie la nature en un temps et en un lieu particulier ? » Ce qui est ressorti finalement assez clairement de cette controverse, ce n'est pas son règlement en faveur d'un côté ou de l'autre, mais l'affirmation de la pluralité nécessaire des types d'épistémologies dans la science écologique. Sharon E. Kingsland situe donc dans les années 1960 la prise en compte, en écologie, d'une nécessaire polyépistémologie[2]. Or, nous pouvons déjà signaler que cette prise de conscience et l'acceptation d'une telle évolution dans la méthode est tout à fait équivalente ici à celle que nous avons pu également repérer dans l'histoire des domaines qui nous ont intéressé (voir notre deuxième époque). Sharon E. Kingsland caractérise l'histoire de l'écologie à partir de ce moment-là comme étant celle de changements incessants dans les critères des méthodes à imposer à la nature pour la connaître (ce qu'on appelle l'épistémologie), changements ne dépendant notamment parfois que de l'esprit du temps. D'où le fait que se confirme, selon nous, la nécessité pour l'historien et le philosophe de se livrer à une histoire intellectuelle des sciences et des techniques contemporaines, surtout lorsque l'on s'intéresse à des sciences à épistémologies à la fois diversifiées et labiles, comme c'est le cas de beaucoup de sciences au 20ème siècle.

Par ailleurs, une tension, celle-ci constante et encore actuelle selon Kingsland, traverse toute l'histoire de l'écologie des populations : la tension entre la nécessité d'une vision historiciste des phénomènes vivants en écologie (c'est-à-dire le fait de considérer qu'ils appartiennent à une histoire, à des histoires de vies et d'évolutions singulières) et les tentatives de mathématiser qui se soldent toujours, jusqu'il y a peu, par la suppression de cette historicité. Beaucoup de controverses ont été dues, selon Sharon E. Kingsland, à cette tension durable[3].

Dans le détail des chapitres de ce livre, l'auteur passe alors en revue un certain nombre d'acteurs qui se sont illustrés dans l'écologie des populations, successivement : Alfred Lotka (1880-1949), Raymond Pearl (1879-1940), Vito Volterra (1860-1940), Alexander J. Nicholson (1895-1969), Willliam R. Thompson (1887-1972), G. F. Gause (né en 1910), David Lack (1910-1973), G. Evelyn Hutchinson (né en 1903) et Robert H. MacArthur (1930-1972). Dans les paragraphes qui suivent, nous allons rappeler et commenter un certain nombre des résultats qu'a pu obtenir notre auteur et qui nous ont servi tout à la fois à contextualiser et à mettre en perspective notre propre étude. Mais nous nous limiterons aux travaux qui ont précédé les années 1940, dans la mesure où l'histoire qui nous intéresse (la modélisation de la croissance des plantes) prend précisément une forte autonomie à partir de cette époque.

Tout d'abord, sans vouloir rapporter l'intégralité des résultats de cette étude, il est important, selon nous, de faire remarquer que Sharon E. Kingsland trouve très souvent nécessaire de s'appuyer sur l'hypothèse que des influences philosophiques sont toujours à l'œuvre en écologie mathématique, science que l'on pourrait croire épargnée par de telles survivances d'un autre âge. Elle juge par exemple nécessaire de nous rapporter le contenu des vues holistiques de Herbert

[1] [Kingsland, S. E., 1985, 1995], p. 4.
[2] C'est nous qui introduisons ce terme pour ramasser l'argument général de Kingsland. Nous procédons ici bien sûr à une spécification du terme de polyphilosophie introduit naguère par Bachelard, notamment *in* [Bachelard, G., 1949, 1962], p. 7.
[3] [Kingsland, S. E., 1985, 1995], p. 5.

Spencer[1] et de « la philosophie de la nature » allemande pour s'expliquer les conceptions holistiques d'Alfred Lotka. Il est un fait que Lotka n'était pas un écologue de formation. Spécialiste de la chimie physique à l'origine, c'était cependant presque en autodidacte qu'il se mouvait librement d'une science à l'autre : physique, chimie, biologie, économie et sciences sociales[2]. Ainsi sa particulière et précoce attention à ce que l'on appellera plus tard, avec la synthèse énergétiste des frères Odum (1953), le caractère « systémique » des phénomènes écologiques ne peut être attribuée à la seule considération d'arguments scientifiques. Cela se confirme si l'on remarque que ses *Elements of Physical Biology*, parus en 1925, ne rencontreront d'abord que très peu d'échos. Or le « système » dont traite Lotka n'est rien de moins que le monde en son entier. Et les transferts très fréquents de diverses méthodes mathématiques entre différents domaines de la science (physique, biologie, écologie, etc.) s'autorisent déjà chez lui d'une vision unificatrice de type énergétiste. Mais, dans les années 1920, ces modèles peuvent apparaître comme excessivement spéculatifs, voire purement phénoménologiques aux yeux de ses premiers lecteurs. Et de ce fait, Sharon E. Kingsland se trouve légitimée à imputer ce type de spéculations, osées pour l'époque, à des intuitions ou des représentations philosophiques. D'où le fait que s'explique aussi pour nous ce recours à l'histoire des idées dans leurs diverses formes d'expression, lorsque l'on s'intéresse à l'émergence d'une science nouvelle. Lotka prônait en fait la constitution d'une « biologie physique » à l'image de la chimie physique à partir de la considération de ces seuls facteurs énergétiques communs aux deux domaines concernés[3]. Sharon E. Kingsland montre alors qu'il n'y a pas même jusqu'aux détails de ses modèles mathématiques de l'évolution darwinienne qui ne doivent quelque chose aux idées d'Herbert Spencer, plus encore qu'aux idées vagues de l'énergétique de W. Ostwald[4]. C'est là encore, selon nous, une confirmation, sur le cas de l'écologie mathématique naissante, de la nécessaire prise en compte de l'imbrication de l'histoire des idées et de l'histoire des sciences, surtout lorsque l'on se penche sur l'histoire de la modélisation. Dans les pratiques de modélisation mathématique, à cause du déracinement corrélatif, il règne en effet une liberté et une mobilité épistémologiques inédites, qui rendent la science perméable aux esprits du temps, sans pour autant qu'elle demeure durablement prisonnière de simples idéologies de passage. Cette labilité épistémologique rend la science perméable, certes, mais surtout, et c'est ce que n'ont pas souvent vu les critiques pressés des idéologies en science[5], elle permet en retour qu'aucune cristallisation définitive ne se produise, qu'aucune épistémologie ne prenne trop solidement et illégitimement le dessus sur toutes les autres. Signalons ici qu'en ce qui concerne notre objet d'étude, nous pouvons à bon droit nous poser la question de savoir si ce polyépistémologisme, assumé à une certaine époque, décrit bien toujours l'état actuel général de la méthode scientifique dans les sciences du complexe. Peut-être cette phase que décrit Kingsland est-elle déjà vouée à s'effacer progressivement, depuis les années 1990, non sans qu'on en ait tiré bien des leçons.

Par ailleurs, les travaux de Kingsland montrent que Lotka a également fondé son approche énergétiste et systémique avant l'heure sur sa connaissance de l'économie mathématique du 19ème siècle et des travaux de Cournot, Walras, Gossen, Jevons et Pareto. Lotka a alors essayé de traduire les concepts disponibles de la tradition utilitariste (concepts eux-mêmes déjà mathématisés par Jevons sur le modèle des principes d'optimum existant en physique) en des

[1] Selon elle, la doctrine de Herbert Spencer « embrassait une vision de l'homme comme une part active d'un cosmos interconnecté », [Kingsland, S. E., 1985, 1995], p. 6.
[2] [Kingsland, S. E., 1985, 1995], p. 28.
[3] [Kingsland, S. E., 1985, 1995], p. 26.
[4] [Kingsland, S. E., 1985, 1995], p. 41.
[5] Comme celles d'Althusser (1967), Badiou (1969) et Lecourt (1972), par exemple.

termes valables d'un point de vue de l'adéquation ou de l'adaptation biologique d'une espèce à une autre, d'une espèce à son milieu[1]. Cet emprunt très précoce de ce qui allait devenir l'écologie mathématique à l'économie politique (domaine où avait pourtant déjà cours l'analogie entre les flux économiques et les énergies physiques) doit être selon nous souligné, parce que la plupart des transferts de modèles mathématiques entre sciences humaines et sciences de la nature ou entre sciences de la nature elles-mêmes partiront pendant très longtemps, comme le confirment en un sens certains pans de notre histoire des modèles de plantes, d'un point de vue énergétiste général destiné à rendre homogènes les différentes variables intervenant dans les divers domaines concernés. Longtemps, la considération de l'énergie (puis de l'entropie) servira comme un argument ontologique visant à légitimer le transfert de diverses représentations formalisées d'un champ à l'autre des sciences, à savoir d'abord essentiellement de celui des faits naturels à celui des faits humains (de la physique à l'économie) et inversement (de l'économie à l'écologie ou à la physiologie, par exemple).

L'énergie servira ainsi d'horizon d'homogénéisation ontologique et de rencontre. De par la capacité des scientifiques du début du 20ème siècle à traduire des flux naturels comme des flux humains en termes énergétiques, elle autorise une certaine forme d'homogénéisation du fait naturel et du fait humain. Elle permettra ainsi de justifier les analogies d'abord les plus surprenantes. Dans la vision philosophique de Lotka, il s'agit donc moins de recourir aux modèles mathématiques comme autant de pures analogies formelles et phénoménologiques que comme transferts théoriques fondés en raison, au moins partiellement, de par l'invocation, légitime selon lui, des flux d'énergie universels et transgressant les frontières entre l'humain et le naturel, entre le populationnel (la phylogenèse) et l'individuel (l'ontogenèse). Cependant, il admet que les individus « transformateurs d'énergie » qui interviennent dans ses modèles ne sont encore que des abstractions simplifiantes.

C'est le biologiste et zoologiste américain Raymond Pearl qui fit véritablement connaître et reconnaître les travaux de Lotka dans les milieux de l'écologie. Son approche personnelle lui permit en effet de rendre les modèles mathématiques de populations moins spéculatifs et moins philosophiques aux yeux de ses collègues, ainsi que plus adaptés à l'approche expérimentale. Il a en effet contribué au raffermissement des liens entre les méthodes statistiques de la démographie humaine et celles des sciences biologiques, *via* la biométrie. Ses arguments en faveur des modèles n'étaient pas de même type que ceux de Lotka. De sa formation statistique à Londres, auprès de Karl Pearson, entre 1905 et 1906, il garde une approche épistémologique franchement positiviste de ce qu'il appellera alors la « biologie des groupes ». Il avait été en effet fortement impressionné par l'ouvrage de Karl Pearson *The Grammar of Science*, publié en 1892[2]. Dans cet ouvrage, le statisticien Karl Pearson décrit les différentes phases qui permettent de mener à bien toute recherche scientifique, notamment le mode de construction des lois des phénomènes. Selon Pearson en effet, le scientifique se construit une image du monde extérieur à partir du seul matériau brut de la perception sensible. Par la suite, son objectif essentiel est de parvenir à classer ces faits élémentaires. Le talent du scientifique s'exerce donc dans la reconnaissance de certaines redondances ou de certaines relations mutuelles entre ces faits. Sharon E. Kingsland résume alors la suite des étapes que le scientifique doit suivre selon Pearson :

[1] [Kingsland, S. E., 1985, 1995], pp. 41-42.
[2] [Kingsland, S. E., 1985, 1995], pp. 56-58. Voir [Pearson, K., 1892, 1937, 1949].

« Une fois que les faits sont classés, un scientifique doit appliquer son imagination créative pour exprimer ces faits de la façon la plus économique. Ce processus mène à l'énonciation de lois scientifiques. »[1]

Notre auteur cite alors Karl Pearson lui-même :

« La proposition singulière, la formule brève, les quelques mots qui, dans notre esprit, remplacent un grand éventail de relations entre des phénomènes isolés, c'est cela que nous appelons une loi scientifique. »[2]

L'étape suivante consiste en un retour à l'expérience par un test de cette loi hypothétique effectué à l'aide de nouveaux faits empiriques. Or, cette invention de lois entre elle-même dans un processus général d'expression toujours plus précise et toujours moins approchée des relations générales qui apparaissent dans les faits observés. Tout en visant un éventail toujours plus grand de faits, la loi, régulièrement modifiée au regard des expériences successives toujours plus fines, est donc censée également coïncider de plus en plus avec la loi la plus fondamentale et la moins approchée de la nature, dans le domaine concerné. À cet égard, Pearson s'autorise explicitement des réflexions de Bacon pour confirmer la vision inductiviste du développement du savoir scientifique telle qu'il la présente. Et c'est Newton qui, selon lui, a réussi le premier à mener à bien une telle méthode.

Si donc l'inspiration de Pearl est positiviste, elle n'en demeure pas moins attachée à la construction de lois vraiment générales et à valeur fondamentale. Nous devons bien comprendre ici que, dans cette perspective positiviste propre à la biologie des années 1900-1920, donc dans une vision épistémologique proche de celle de Bacon, de Mach mais aussi de Comte (ce dernier étant moins connu dans les pays anglo-saxons) et, en un sens aussi, de Duhem, l'espoir de l'accès à la réalité par le biais de la science n'est pas totalement supprimé puisqu'il est en fait déplacé sur l'espoir d'une unification cognitive, sur un espoir seulement intra-cognitif, il est vrai, d'une unification des lois sous une seule ou sous quelques unes d'entre elles, décrétées fondamentales. À cette époque donc, l'unification des lois remplace encore la connaissance ontologique effective comme idéal asymptotique de la science. Chez les biologistes, l'heure n'est pas encore tout à fait à la polyépistémologie ni à l'acceptation des approches parallèles et à différentes échelles des mêmes phénomènes. Ainsi peut-on s'expliquer l'approche holistique de Raymond Pearl par laquelle il s'autorise à passer des organismes aux populations. « Il avait tendance à traiter les populations comme un tout », nous précise Sharon E. Kingsland, même s'il savait que les populations ne bénéficiaient pas du même degré d'intégration, comme l'avaient déjà signalé bien d'autres biologistes après les philosophes Auguste Comte puis Herbert Spencer. Ainsi se préoccupait-il de suivre les caractéristiques globales des populations (comme le taux de croissance ou de mortalité) de la même façon que la durée de vie des individus. Il considérait cette durée de vie elle-même non pas comme une caractéristique séparée mais comme « l'expression structurelle-fonctionnelle totale de l'organisation ou de la structure de l'individu », selon ses propres termes, rapportés par Sharon E. Kingsland[3]. La loi de la croissance d'une population était donc identifiée à quelque chose comme la vitalité d'un supraorganisme. C'est la raison pour

[1] [Kingsland, S. E., 1985, 1995], p. 58.
[2] Karl Pearson, *The Grammar of Science*, 2nde édition, London, Adam & Charles Black, 1900, p. 31, cité *in* [Kingsland, S. E., 1985, 1995], p. 58.
[3] [Kingsland, S. E., 1985, 1995], p. 61.

laquelle la courbe logistique ou courbe en S, déjà présente chez Verhulst et Quételet[1], lui apparut incarner ce que l'épistémologie de Pearson lui commandait de rechercher sous la forme d'une loi unitaire de la croissance, tant des organismes que des populations[2]. On peut donc comprendre que, malgré son inductivisme de principe, c'est-à-dire son souci de fonder les lois dans l'expérience et les mesures statistiques, Pearl fut finalement conduit à hypostasier la courbe logistique au point de croire pouvoir la reconnaître comme sous-jacente à de nombreux phénomènes de croissance de différentes natures. Certes, Pearl ne prenait pas la courbe logistique comme l'expression d'un mécanisme sous-jacent et qui serait ainsi omniprésent dans toute croissance mais simplement comme l'image la plus précise pour décrire de tels phénomènes. Avec elle, il croyait avoir atteint l'optimum de ce processus de raffinement des hypothèses mathématiques, dont parlait Pearson, et selon lequel on pouvait légitimement tendre à l'expression scientifique unique et synthétique d'une série de phénomènes. Même s'il ne croyait bien sûr pas au réalisme du modèle mathématique, c'est-à-dire en sa capacité à décrire l'essence des mécanismes sous-jacents, il croyait donc quand même en la possibilité pour le scientifique de parvenir à une optimisation mathématique unique et univoque qui prendrait la forme d'un modèle valant comme loi-mère en quelque sorte[3]. C'est pourquoi il n'hésitait pas à comparer le statut de sa courbe logistique aux lois de Kepler ou à celle de Boyle[4], indiquant par là qu'il attendait son Newton. Et en 1927, il affirmait que cette loi était désormais à considérer comme un fait directement observé et, de ce fait, incontestable[5].

Les critiques qui ont été faites à l'encontre de l'approche de Pearl consistaient principalement en l'invocation de deux types d'arguments : selon les premiers, cette approche mathématique, partant de l'identification abusive entre des populations et des individus, reposait sur l'hypothèse fausse d'une très faible interaction entre la population et son « milieu » (milieu social, historique et économique pour ce qui est de la démographie), ce qui bien évidemment la disqualifiait aussi aux yeux des écologues ; selon les autres, on ne pouvait considérer que cette courbe logistique avait la moindre justification théorique quant aux phénomènes élémentaires susceptibles de conduire à une telle mise en forme analytique au niveau global.

Nous voulons insister maintenant sur un autre apport historique et épistémologique que l'on doit à l'ouvrage de Sharon E. Kingsland. L'auteur y évoque bien entendu l'épisode tant relaté par ailleurs de la « découverte » conjointe ou simultanée du modèle mathématique de type prédateur-proie par Alfred Lotka et Vito Volterra. L'intérêt de son approche tient au fait qu'elle montre clairement en quoi l'on peut et l'on doit distinguer l'épistémologie de Lotka de celle de Volterra, alors même qu'ils construisent tous deux, quasiment en même temps, le même modèle pour résoudre le même problème scientifique. Pour saisir cette différence, il faut rappeler qu'à l'époque, il existait, en épidémiologie, une manière de produire des modèles mathématiques concurrente de celle de Lotka ou de Pearl. En effet, à partir des travaux de Sir Ronald Ross (qui reçut le prix Nobel en 1902 pour ses travaux sur les causes de la malaria), l'épidémiologie pratiquait déjà une méthode de modélisation que Ross qualifiait de « méthode *a priori* »[6]. Elle consistait à « partir d'hypothèses au sujet de la cause d'une épidémie et de construire un ensemble d'équations

[1] En 1835, ce dernier l'avait reconstruite dans une perspective mécaniste à partir de l'identification entre la résistance à la croissance biologique et la résistance physique à l'entrée dans un milieu.
[2] [Kingsland, S. E., 1985, 1995], pp. 61 et 65.
[3] C'est précisément la croyance en ce caractère unique de la représentation mathématique optimale, abstraction faite de l'échelle d'étude et de l'objectif visé, qui sera remise en question dans les décennies qui suivront, notamment dans les sciences de l'homme, avec Herbert A. Simon. Voir [Simon, H.-A., 1969, 1991].
[4] [Kingsland, S. E., 1985, 1995], p. 68.
[5] [Kingsland, S. E., 1985, 1995], p. 76.
[6] [Kingsland, S. E., 1985, 1995], p. 99.

différentielles pour décrire la situation basée sur ces hypothèses ». Par la suite, par déduction logique et par calcul, on tirait de cette équation des propriétés mathématiques que l'on confrontait aux observations. Cette approche, on le voit, s'opposait nettement à l'inductivisme de Pearson et Pearl. Ross en avait bien conscience lorsqu'il qualifiait cette dernière de « méthode *a posteriori* » puisqu'en effet elle partait avant tout des observations. Or, en épidémiologie, ainsi que le souligne Sharon E. Kingsland, les statistiques pouvaient servir indifféremment aux deux approches parce que l'on disposait de suffisamment d'observations. Alors qu'en écologie, le manque d'observations en termes d'histoires de vies et de populations étant le problème majeur (on manquait cruellement de données en grand nombre), il paraissait aléatoire de ne s'en tenir qu'à la méthode inductiviste ou *a posteriori*. C'est l'entomologiste canadien William R. Thompson qui, dans les années 1920, perçoit alors l'avantage qu'il y a, dans ces conditions, à adopter de préférence la méthode de modélisation *a priori* de Ronald Ross. Cela lui semblait également correspondre à la nouvelle impulsion que donnait le livre fraîchement paru, en 1917, de D'Arcy Wentworth Thompson : *On Growth and Form*. Cet ouvrage légitimait selon lui une approche constructiviste et aprioriste des modèles mathématiques en biologie, approche conçue à partir des seules lois physiques élémentaires gouvernant les formes et la croissance biologiques. Pour sa part, William R. Thompson partit donc d'hypothèses concernant le comportement biologique individuel des insectes dont il étudiait les populations ; et il construisit des modèles *a priori*. Ses collègues lui reprochèrent alors de ne fonder ses hypothèses élémentaires que sur des spéculations, à cause du manque d'information biologique précise dont les scientifiques disposaient en ce domaine. Et Thompson lui-même se rétractera plus tard sous la pression de tels arguments anti-mathématistes. En revanche, pour ce qui concerne une réflexion sur l'histoire des modèles, il est important de noter que ce sont plutôt les travaux de Lotka que William R. Thompson (dans sa période favorable aux modèles) et les disciples de Ross considérèrent comme spéculatifs. Lotka, comme nous l'avons dit, avait en effet une approche inductiviste, plus focalisée sur une échelle globale donc. Ses expressions mathématiques venaient directement d'analogies avec les dynamiques de réactions chimiques telles qu'elles étaient exprimées par des systèmes d'équations différentielles. Et Sharon E. Kingsland précise alors combien la théorie générale des systèmes de Bertalanffy étendra ce type d'approche systémique originellement développée par Lotka[1].

À l'inverse d'Alfred Lotka, Vito Volterra appartenait plutôt à cette école de pensée qui favorisait une interprétation hypothétique, *a priori* et constructiviste des modèles, du type de celle qui avait été développée par Ross et Thompson entre les années 1910 et 1920. C'est sa particulière maîtrise de la physique mathématique[2] qui l'autorisait à penser le problème des dynamiques de populations de prédateurs et de proies en termes de mécanique statistique[3]. Dans ses travaux personnels, les agrégations ou associations biologiques étaient pensées, à un niveau élémentaire et *a priori*, comme des analogues des phénomènes de « rencontres » entre molécules dans un gaz. Cela lui permettait donc de construire un système d'équations valant à échelle globale en partant de ces seules rencontres élémentaires. De son côté, c'est dans une perspective

[1] [Kingsland, S. E., 1985, 1995], p. 103.
[2] Il était professeur de physique mathématique à l'université de Rome.
[3] Sharon E. Kingsland cite ce passage de Volterra - tiré du volume 3 de ses *Opere matematiche,* Rome, Academi dei Lincei, 1962, p. 248 : « Tous ceux de notre génération ont été élevés avec ces principes qu'un monde moderne appelle mécanicistes ; et, en effet, l'idée selon laquelle tous les phénomènes, au moins ceux qui tombent dans le domaine de la physique, peuvent être réduits à des phénomènes de mouvement et peuvent être transportés dans la sphère de la mécanique classique était un dogme auquel adhéraient toutes les écoles et dont l'origine se perd dans la lointaine philosophie cartésienne », [Kingsland, S. E., 1985, 1995], p. 124.

nettement systémique et influencée par la chimie que Lotka s'autorisait au contraire d'une analogie directe et seulement verbale entre des rapports entre populations et des concentrations chimiques. Cela le conduisait immédiatement, et sans construction, à l'expression mathématique des « réactions » ou « relations » destructrices qui en découlent. Le reproche de spéculation, on le voit, touchait donc les deux côtés : le côté de l'approche *a posteriori*, comme celui de l'approche *a priori*. Or, tout dépendait du point de vue où l'on se plaçait.

Réfléchissons donc ici aux soubassements épistémologiques qui, selon nous, se révèlent à l'occasion de ces critiques rapportées par Sharon E. Kingsland. Si en effet l'on considérait que le rôle de la mathématisation était de permettre de proposer une explication hypothétique du passage des phénomènes d'une échelle micro- à une échelle macroscopique, alors on privilégiait l'approche explicative, constructive et *a priori* de Ross et Volterra. Mais si, au contraire, on accordait à la mathématisation le rôle de décrire phénoménologiquement des relations entre des observations à une échelle globale (ce qui imposait de renoncer d'abord à un usage constructif ou constitutif et « réaliste » des concepts mathématiques), pour qu'ensuite par approximations formelles successives on découvre la loi-mère unificatrice de toutes ces lois (loi-mère de nature donc purement linguistique), alors on privilégiait l'approche énergétiste de Lotka. Cette approche, apparentée à la vision épistémologique contemporaine de Duhem n'est pas sans rapport, on le voit avec un certain conventionnalisme finaliste porté par une croyance ou une foi en un ordonnancement général, qu'il soit divin ou naturel : les lois ou les modèles mathématiques sont purement linguistiques et théoriques certes, d'où l'acceptation des commandements positivistes, mais le scientifique théoricien doit partir du principe qu'au final il existera une loi-mère formelle qui permettra de s'apercevoir qu'elle est fondée, non pas en essence, sur un être donné empiriquement, mais en raison, sur une harmonie générale, donc qu'elle est fondée sur une finalité.

Le finalisme implicite propre à cette première approche systémique en écologie, celle de Lotka, s'opposait donc frontalement au mécanicisme, considéré comme moins spéculatif parce que plus galiléen et newtonien, de Ross et Volterra qui, en valorisant une approche mathématique constructiviste des problèmes écologiques et biologiques, pratiquait explicitement la co-construction des concepts mathématiques et des concepts écologiques et donc semblait davantage donner à voir comment on pouvait justifier dans le détail l'introduction nouvelle des mathématiques dans ces sciences du vivant. Or, selon nous, les biologistes, surtout en France, ont d'abord préféré retenir de ce modèle de Lotka-Volterra cette justification constructive et *a priori* de Volterra, et cela pour plusieurs raisons. Ce n'est qu'ensuite, après la seconde guerre mondiale, que Lotka fut redécouvert comme instigateur de l'approche systémique. Ils préférèrent d'abord l'approche *a priori* parce que Volterra était bien plus en vue dans le monde universitaire, mais aussi parce que Volterra l'avait abondamment diffusée lors de ses conférences à l'Institut Henri Poincaré de l'hiver 1928-1929[1]. Ils la préférèrent aussi parce qu'elle consonait bien sûr avec la formation classique, mécaniciste, anti-finaliste, des biologistes et des physiciens mathématiciens de l'époque. Ils la préférèrent enfin parce qu'elle permettait un traitement mathématique du problème généralisé au cas où l'on avait affaire à plusieurs populations de prédateurs et de proies.

Par la suite, Lotka se tourna, de son côté, vers la démographie et Volterra continua à développer ses analogies physiques à travers les concepts de « travail démographique », d'« énergie démographique » et de « principe de moindre action vitale »[2]. Or, par ailleurs, avec Wladimir I. Vernadsky et Georgii Frantsevitch Gause, une approche holistique similaire à celle de

[1] Voir sur ce point [Volterra, V., 1931, 1990], p. v.
[2] [Kingsland, S. E., 1985, 1995], p. 115.

Lotka voit le jour en Russie mais dans un contexte biogéochimique. Vernadsky fonde en effet sa vision holistique sur des considérations de cycles globaux de matières et d'énergie dans la biosphère. C'est donc bien aussi une approche énergétiste mais qui prête davantage son attention à la totalisation et à la régulation des cycles énergétiques et matériels généraux qu'aux acteurs considérés comme « transformateurs » d'énergie, au sens de Lotka. William R. Thompson, pour sa part, en insistant sur l'idée que les lois ou les modèles mathématiques décrivent seulement la nature, mais ne la gouvernent pas, finira par critiquer fortement l'approche par modèles mathématiques du fait que, selon lui, les mathématiques ne peuvent servir à prédire le fortuit qui est pourtant la règle dans le monde du vivant[1]. Le fortuit naît selon lui, comme pour Cournot, de l'intersection d'un grand nombre de séries de causes fortement intriquées. Et les équations mathématiques capables de décrire de telles rencontres non seulement ne sont pas pratiquement solubles, mais en fait c'est le caractère essentiellement événementiel du monde vivant, son historicité fondamentale, qui fait obstacle par principe à sa formalisation mathématique adéquate. Il en retient la fondamentale imprédictibilité des phénomènes du vivant.

Pour finir, dans sa conclusion et dans sa postface de 1995, en accord avec ce diagnostic précoce de Thompson, Sharon E. Kingsland considère rétrospectivement que l'oubli de l'historicité des phénomènes écologiques a effectivement fait la limite principale des modèles mathématiques en écologie jusqu'aux années 1980. Comme historienne des sciences contemporaines, elle s'autorisait, en 1985, à pronostiquer le prochain développement de débats critiques sur l'historicité des phénomènes vivants de par leur complexité. En 1995, elle constate avec satisfaction que son pronostic était le bon. La génétique des populations, évolutionnaire par principe, a ainsi été rejointe par l'écologie des populations et la dynamique des populations dans des propositions de synthèse comme la sociobiologie de Edward O. Wilson. Une plus grande attention à l'histoire serait ainsi l'apanage des modèles les plus récents. Mais l'appel à une approche historique peut recouvrir en fait plusieurs demandes de natures différentes : considérer toute description d'un écosystème comme une histoire à raconter à cause de la contingence des faits qui s'y produisent, ou bien considérer l'évolution des espèces dans leur généalogie phylogénétique, ou encore élargir la fenêtre temporelle de description à une échelle de plusieurs siècles ou milliers d'années[2]. Quoi qu'il en soit, la tendance actuelle, selon Kingsland, est à la complexification et à l'accroissement du « réalisme » des modèles du fait de l'augmentation des performances des ordinateurs.

Une des dernières idées développées par notre auteur nous paraît d'importance. Il s'agit de l'acceptation récente de ce que nous avions appelé une polyépistémologie dans le domaine de l'écologie. Sharon E. Kingsland cite ainsi une phrase de l'écologue théoricien Robert May :

« Plus que jamais les questions écologiques doivent être étudiées à différents niveaux et sur des échelles temporelles et spatiales différentes, et cela en partant de la façon donc l'accident évolutionnaire, l'environnement et les contraintes biomécaniques forment les histoires de vie des organismes individuels dans des temps et des lieux particuliers, jusqu'à la façon dont la tectonique des plaques et le changement climatique global ont aidé à la formation de royaumes biogéographiques. »[3]

---

[1] [Kingsland, S. E., 1985, 1995], p. 140.
[2] [Kingsland, S. E., 1985, 1995], p. 222.
[3] C'est à la page 228 que Sharon E. Kingsland cite cet extrait de la page 339 de « Ecological Concepts : The Contribution of Ecology to an Understanding of the Natural World », Cherrett, ed., Oxford, Blackwell Scientific, 1989 ; il s'agit de l'extrait d'un article de Robert May intitulé « Levels of Organization in Ecology ».

Dans de tels propos, on perçoit qu'un changement s'est opéré en faveur d'une approche multi-niveaux des problèmes écologiques et biologiques. Dans sa postface, notre auteur ne se préoccupe pas, bien sûr, d'exposer en détail comment les scientifiques en sont arrivés à une telle polyépistémologie assumée. La période étudiée et la définition de son domaine (l'écologie des populations) lui en interdisaient l'explicitation. De notre côté, nous sommes donc amené à nous demander si ce pluralisme épistémologique caractérise également les domaines qui nous préoccupent et, si tel est le cas, à quels facteurs on peut historiquement l'imputer. De la restitution historique assez précise que nous a laissée Kingsland, nous pouvons d'ores et déjà retenir qu'une telle attitude scientifique n'était pas présente dès les premières modélisations mathématiques en écologie. Mais en a-t-il été de même dans d'autres sciences du vivant ? Enfin, ce problème, soulevé déjà par William R. Thompson dans les années 1930, de la difficile mathématisation du contingent et de l'historique, n'a-t-il pas été rencontré par d'autres disciplines comme, par exemple, les sciences de la morphogenèse ? Comment a-t-il été réglé ou contourné ? Quel rôle la simulation a-t-elle joué dans les tentatives de résolution de ce problème apparemment transdisciplinaire ? En outre, on peut tirer de la restitution de cette histoire que, très tôt, l'économie a fourni des modèles à l'écologie jusqu'à la synthèse énergétiste des frères Odum. Et ce transfert a été possible car, dans les domaines concernés, on ne considérait à chaque fois que des phénomènes de flux, de transports, d'échanges de matières ou d'énergie. De même, pour ce qui est des transferts de modèles de la mécanique ou de la chimie à l'écologie, on n'y considérait là encore que des phénomènes de rencontre, des phénomènes énergétiques ou d'échanges de matière, comme nous l'a montré l'évocation des travaux différents, par l'esprit, de Lotka et de Volterra. Energétisme et mécanicisme ont donc été les deux principaux horizons d'homogénéisation des concepts et donc de transfert des modèles mathématiques entre domaines scientifiques hétérogènes, cela avant que n'intervienne l'« informatisme » hérité du mariage de la théorie de la communication avec la cybernétique. Mais qu'en a-t-il été pour les phénomènes de ramification, de croissance organique ? Le fait que certains de ces phénomènes biologiques soient davantage à considérer comme autant de modes différents de mise en espace, avant d'être des mises en fonctionnement, n'a-t-il pas été, pendant un temps, un obstacle au transfert de modèles jusque là assis sur l'homogénéisation énergétiste, mécaniciste ou « informatiste » ? De manière suggestive, l'histoire de la formalisation de la croissance et de la forme des plantes montre en effet que ces transferts de concepts et de modèles issus de la physique y ont été plus hasardeux.

Jean-Paul Deléage

Le physicien et historien des sciences Jean-Paul Deléage a écrit l'une des histoires de l'écologie les plus compréhensives et les plus complètes parues en français de ces vingt dernières années[1]. Elle reprend mais complète assez bien l'étude de Kingsland. Une place assez importante y est donnée à l'émergence des pratiques de modélisation. Cependant la perspective historique est davantage attentive à l'émergence et aux devenirs des concepts théoriques de la science écologique, de sa naissance aux années 1980, qu'aux soubassements proprement épistémologiques ou philosophiques des diverses mathématisations que l'écologie a pu mettre en œuvre. Rappelons certains des apports de cet ouvrage dans la perspective qui nous préoccupe, et tâchons de mettre spécifiquement en lumière ce qu'on y apprend des choix épistémologiques en matière de mathématisation et de modélisation.

[1] [Deléage, J.-P., 1991, 1994]. Elle paraît après les travaux de Pascal Acot [Acot, P., 1988] et ceux de Jean-Marc Drouin [Drouin, J.-M., 1991].

Tout d'abord, en précisant les origines historiques des concepts d'« économie de la nature » puis d'« écologie », Jean-Paul Deléage nous permet de comprendre les liens natifs qui unissent l'écologie à l'économie politique et que l'on aurait pu croire relativement récents. C'est en effet chez les physiocrates, en particulier chez Quesnay, que l'économie des hommes est pour la première fois explicitement pensée en lien avec l'« économie de la nature », il est vrai au moyen d'une lecture théologique de cette dernière. Ainsi, dès le 18ème siècle pour Deléage, l'« histoire naturelle » s'est progressivement transformée en « une économie politique de la nature, prémices de l'écologie »[1]. Mais c'est seulement à la fin du 19ème siècle, dans la décennie 1880-1890, et dans une perspective politique principalement inspirée du socialisme, que Serge Podolinsky puis Patrick Geddes vont penser l'économique et l'écologique en termes communs d'énergie et de « bilan énergétique »[2]. Jean-Paul Deléage attribue alors aux préjugés « anti-écologiques et anti-thermodynamiques » l'oubli prolongé de ces premières approches énergétistes communes aux faits humains et aux faits naturels[3]. Ces préjugés ont été partagés tant par l'orthodoxie de l'économie politique que par les économistes ou les philosophes marxistes[4]. Notre auteur rapporte ensuite le contenu d'un article d'Arthur Tansley, publié en 1935 dans la revue *Ecology*, et qui plaide pour l'introduction du terme « écosystème » en écologie mais sans que l'on considère par là que l'on a affaire à un organisme. Tansley met donc les écologues en garde contre une vision organiciste des populations et des écosystèmes. Et il rejette ainsi toute conception finaliste que pourrait implicitement imposer une approche trop délibérément holistique. Il rappelle que l'écosystème est une construction mentale des scientifiques pour le besoin de l'étude mais qu'il ne doit pas être considéré comme une « donnée brute »[5].

Par la suite, dans un chapitre intitulé « Tout est énergie ! », notre auteur montre combien, dans l'après-guerre, à partir des travaux de G. Evelyn Huchinson, mais surtout à partir de l'article fondateur de Raymond Lindeman[6] prônant une approche des écosystèmes par la dynamique des réseaux trophiques, la vision énergétiste a été développée tous azimuts en écologie. L'analyse énergétique est popularisée par l'ouvrage d'Eugene Odum, *The Fundamentals of Ecology* de 1953. Deléage note que c'est sous l'influence du jeune frère de Eugene Odum, le spécialiste de chimie nucléaire Howart T. Odum, que, dans ce livre, transparaît une vision très fortement systémique inspirée de Hutchinson et de Lotka. Les diagrammes énergétiques ressemblent ainsi à des circuits électriques. Les frères Odum introduisent alors un principe thermodynamique supplémentaire par rapport à ceux de la physique et qui serait selon eux spécifiquement suivi par les êtres vivants établis en systèmes. Il s'agit du « principe du maximum de puissance ». Ce

[1] [Deléage, J.-P., 1991, 1994], p. 37.
[2] [Deléage, J.-P., 1991, 1994], pp. 68-70.
[3] [Deléage, J.-P., 1991, 1994], p. 70.
[4] Pour confirmer la pertinence de ce rappel allusif de Deléage, on peut se référer ici au contenu de quelques diatribes de Lénine, extraites de « Matérialisme et empiriocriticisme » : « Le 'pragmatisme' est peut-être le 'dernier cri de la mode' de la philosophie américaine la plus récente. C'est peut-être au pragmatisme que les revues philosophiques accordent la part la plus large. Le pragmatisme tourne en dérision la métaphysique du matérialisme et de l'idéalisme, porte aux nues l'expérience et seulement l'expérience, voit dans la pratique l'unique critère, se réclame du courant positiviste en général, *invoque plus spécialement Ostwald, Mach, Pearson, Poincaré, Duhem,* le fait que la science n'est pas une 'copie absolue de la réalité', et … déduite de tout cela, le plus tranquillement du monde, l'existence de Dieu, à des fins pratiques, exclusivement pratiques, sans la moindre métaphysique, sans dépasser aucunement les limites de l'expérience », [Lénine, V. I., 1908, 1973], pp. 338-339. C'est l'auteur qui souligne. Dans les pages suivantes, Lénine range alors la doctrine d'Ostwald et l'épistémologie de Pearson parmi les « subterfuges théoriques » qui témoignent en fait d'un « idéalisme physique » allié, comme tout idéalisme, de la religion et de la bourgeoisie en place. Voir *ibid.*, p. 340 et [Lénine, V. I., 1894-1923, 1978, 1982], pp. 180-181. On voit donc qu'en effet l'énergétisme n'était pas en grâce auprès des marxistes du début du siècle.
[5] [Deléage, J.-P., 1991, 1994], pp. 119-120.
[6] Publié en 1942.

principe, dont Howard T. Odum attribue la paternité à Lotka, permet de rendre compte de la situation la plus fréquente des écosystèmes : le non-équilibre. Jean-Paul Deléage le décrit ainsi :

« Selon ce principe, les écosystèmes qui ont des aptitudes particulières à l'utilisation de la puissance des flux d'énergie, sont aussi les plus aptes à la survie et à la domination. »[1]

Sur les diagrammes d'Howard T. Odum apparaissent alors conjointement les processus naturels et les processus artificiels. Ce qui l'autorise à ne plus faire de différence de nature entre les faits naturels et les faits sociaux. À la fin de son chapitre, notre auteur rappelle pourtant brièvement la teneur des critiques qu'un chercheur comme Nicholas Georgescu-Roegen avait pu adresser à l'encontre de cette vision totalement et exclusivement énergétiste. Mais, toujours selon notre auteur, Georgescu-Roegen aurait surtout insisté sur le fait que le « métabolisme des échanges entre la nature et la société » évolue dans l'histoire et ne peut donc être considéré comme structurellement identique et stable puisque sa construction est toujours en partie dépendante d'un état donné de la société[2]. Cependant Jean-Paul Deléage oublie de rappeler aussi l'argument physique et thermodynamique également rapporté par les écrits de Georgescu-Roegen. Indiquons-le ici en quelques mots en citant l'auteur lui-même et en le commentant : « il n'y a pas de création de matière à partir de la *seule* énergie. »[3] Autrement dit, dans les modèles énergétistes, on ne peut faire jouer un rôle symétrique à l'énergie et à la matière. La matière terrestre (le géochimique) détient en elle une « information », une « énergie » qui ne peut pas totalement être reconstituée à partir de seuls apports d'énergie libre, comme c'est le cas pour beaucoup de minéraux. Or, en recourant à des diagrammes de flux purement énergétiques ou ramenant l'organisation de la matière à de l'énergie, on donne la fausse impression d'un possible recyclage alors que par principe l'écosystème intégrant l'humain, et qui mobilise donc de la matière brute directement soustraite à la Terre, ne peut autoriser un tel recyclage[4].

Dans le chapitre suivant, intitulé « Complexités », Jean-Paul Déléage rappelle d'abord que la théorie de l'information, concurremment avec l'approche énergétiste, a eu son heure de gloire en modélisation écologique, des années 1960 à la fin des années 1970. La formalisation de Claude Shannon puis celle de Léon Brillouin ont été prisées pendant un temps parce qu'elles permettaient de commencer à rendre compte de la diversité écologique considérée de plus en plus comme caractéristique fondamentale d'un écosystème[5]. Les écologues Robert MacArthur et Ramon Margalef ont ainsi pensé les écosystèmes en analogie avec les réseaux de communication tels que les conçurent les ingénieurs en télécommunications dans les années 1940. Or, dans ce cas particulier de transfert méthodologique, on a affaire, pour la première fois en écologie, à l'intervention d'une science de l'ingénieur sous la forme d'un réservoir d'analogies et donc de modèles mathématiques. L'information y rendait compte de la diversité spécifique de l'écosystème. À chaque espèce présente dans l'écosystème correspondait un type de symbole ; et le nombre de symboles de ce type était directement proportionné au nombre d'individus de cette espèce.

[1] [Deléage, J.-P., 1991, 1994], p. 137.
[2] Pour cet argument, on peut se rapporter en effet à [Georgescu-Roegen, N., 1979, 1995], p. 108.
[3] [Georgescu-Roegen, N., 1979, 1995], p. 158.
[4] [Georgescu-Roegen, N., 1979, 1995], pp. 172-173 : « la matière, tout autant que l'énergie, est soumise à une dégradation entropique continuelle et irrévocable […] la thermodynamique traditionnelle ne mentionne en aucune manière la dégradation entropique de la matière, elle a créé l'impression que la matière ne se dégrade pas. La littérature de base laisse en effet croire que tout convertisseur matériel dure indéfiniment sans la moindre usure. »
[5] [Deléage, J.-P., 1991, 1994], pp. 174-178.

L'écosystème était donc analysé comme une communication symbolique dont on pouvait mesurer la redondance ou la richesse informative, c'est-à-dire la diversité, par l'entropie informationnelle.

Avec ce type de modélisation « informatique », l'horizon d'homogénéisation est donc déjà plus abstrait que ceux de l'énergétisme ou du mécanicisme. Ici, c'est la seule notion d'information qui autorise le transfert des modèles de télécommunication au domaine de l'écologie. Or, l'information est de nature symbolique, linguistique, classificatoire, plus que matérielle. Elle renvoie donc explicitement à une exstanse[1] plus qu'à une substance au sens dans lequel Bachelard introduisait ce néologisme. C'est-à-dire que l'« information » d'un écosystème, à la différence de son « énergie » ou de ses taux de « rencontres » mécaniques, dépend uniquement de ce que les hommes peuvent y discerner de façon abstractive, nominale, à savoir l'espèce, en l'occurrence. Le recours à la notion d'information empêche donc explicitement, et d'une façon inédite dans l'histoire de l'écologie mathématique, toute lecture essentialiste de l'horizon d'homogénéisation. La mathématisation ne sert plus ici à formaliser des êtres ou des réalités essentielles qui manifesteraient leurs pouvoirs dans des phénomènes observables de différentes natures. Alors que les horizons d'homogénéisation propres à l'énergétisme et au mécanicisme pouvaient, l'un comme l'autre, sembler encore s'appuyer sur la manifestation partielle d'une réalité commune considérée comme patente, qu'elle soit supposée (sous-jacente, constitutive), ou sur-imposée (globale, holistique), la modélisation « informatique », au contraire, ne repose plus que sur le choix manifestement humain de désigner et de classer, d'organiser et de trier. Il s'agit donc là d'une mathématisation explicite et directe de notre seule perception des phénomènes. Dans ces conditions, on n'est plus très loin de prendre en compte le fait que la formalisation dépende du point de vue de l'observateur, puisque la vision formalisée que l'on a des phénomènes n'est plus considérée comme une approximation objective et ayant son fondement dans les choses mêmes. La voie est ainsi ouverte au modélisme perspectiviste. Le déracinement du modèle est par là accompli.

Cependant, en ce qui concerne le recours aux formalisations de la théorie de la communication en écologie, Jean-Paul Deléage rappelle qu'il fut de courte durée. Un argument décisif, publié en 1978 par l'écologue Paul Colinvaux, participa en effet au déclin d'une telle approche du fait des incohérences qu'elle colportait. Paul Colinvaux rappelait, en substance, qu'on ne pouvait considérer les être vivants d'un réseau trophique comme remplissant des fonctions équivalentes aux nœuds d'un réseau de communication. Il faut considérer qu'ils exercent une fonction tout à fait inverse de ces nœuds de communication et de redistribution de l'information : l'essentiel de leur activité consiste à essayer d'empêcher la communication de la nourriture. Paul Colinvaux écrivait ainsi :

[1] Voir [Bachelard, G., 1949, 1962], p. 39 : « L'électron n'est plus électrique dans le sens où les fluides du 18ème siècle étaient dits électriques. La *centralité* de la notion marquée par le qualificatif *électrique* s'est déplacée. *L'électron n'est plus vraiment une substance électrique*, c'est très exactement une exstance. Même dans des connaissances où l'organisé est un donné manifeste, où l'organisé est un point de départ pour le savoir, on voit bientôt la pensée de réorganisation dépasser l'organisé. » C'est donc ce que Bachelard appelle la « différentielle d'instruction » (*ibid.*, p. 39) qui caractérise le fait que l'on ne considère du donné que le construit qu'on y place à travers les opérations d'instructions à son sujet. Ce faisant, il fait allusion au contexte scientifique de la physique quantique. L'exstance finit donc par ne valoir que comme extensive : « la force centrale d'une exstance étant mesurée par le nombre et la diversité de ses extensions », *ibid.*, p. 39. L'exstance ne renvoie pas à une réalité qui elle, en revanche, donne une intensité, un sens au terme de substance. L'« intensité », l'« intension » que véhicule la notion de substance est à psychanalyser pour Bachelard en ce qu'elle recèle toujours en elle des sources de convictions philosophiques irrationnelles. En tant que « construits », les « donnés » auxquels a affaire la physique quantique ne sont donc que des ensembles de possibilités d'opérations rationnelles, de réorganisations conceptuelles ou de pratiques phénoménotechniques. C'est en ce sens qu'ils sont des exstances.

« Les vrais individus sont en fait des barrières sur les routes, qui freinent l'écoulement de la nourriture. Et c'est ce point qui rend le modèle non seulement irréel mais absurde. »[1]

On ne peut donc exprimer la stabilité propre aux réseaux trophiques de la même façon que la stabilité des réseaux de communication. Pour ces derniers, la stabilité est d'autant plus grande que les nœuds communiquent fortement et sont davantage reliés à d'autres, alors que dans les réseaux trophiques, la tendance n'est pas à l'intensification ni à l'augmentation numérique des relations, bien au contraire. On peut donc conserver la notion d'« indice de diversité » mais on ne peut faire de ce modèle un modèle dynamique pertinent[2].

Du livre de Jean-Paul Deléage, nous retiendrons enfin son évocation de l'introduction en écologie des modèles de chaos déterministe par Robert May, au milieu des années 1970. Les travaux de Robert May ont consisté à mettre en évidence, à partir du modèle logistique classique, des zones de comportements de type chaotique, c'est-à-dire des zones où l'on ne peut déceler extérieurement aucune fluctuation régulière. Ce modèle a beaucoup séduit parce qu'il semblait résoudre au niveau théorique un problème en attente de solution depuis longtemps : on avait déjà souvent observé des fluctuations apparemment aléatoires dans des populations animales. Et ces observations semblaient contredire les tenants d'une explication déterministe des évolutions de populations. Or, selon notre auteur, les études théoriques de Robert May ont permis de réconcilier les déterministes avec les partisans de l'irréductibilité de l'aléatoire. La mise en évidence de l'engendrement d'un comportement complexe à partir d'un modèle simple a contribué à redonner une légitimité à la modélisation mathématique en écologie. Mais en même temps, ce travail théorique sur les cycles limites et les bifurcations ne donna d'abord qu'un argument théorique ainsi que des explications seulement qualitatives. Ce type de mathématisation a donc d'abord joué un rôle semblable à celui de la modélisation mathématique théorique et qualitative en économie telle qu'elle prospère depuis les années 1930. Son rôle a davantage consisté à conserver et à consolider une théorie écologique préexistante et cela aux dépens d'une modélisation opérationnelle puisque, comme le dit notre auteur, « une situation mathématiquement 'chaotique' peut se révéler stable du point de vue écologique ». Selon nous, elle a donc d'abord servi à protéger le noyau dur de la théorie des assauts de l'observation et de ses surprises. Loin donc d'autoriser avant tout une expansion de la modélisation mathématique, elle a semblé d'abord autoriser un refuge dans des représentations théoriques déjà bien établies. Aussi la prise en compte nouvelle et retentissante des mathématiques du chaos a-t-elle été au bout du compte très ambivalente par rapport au développement de la modélisation mathématique. Dans la même page du livre de Jean-Paul Deléage, on tire deux phrases qui témoignent bien de cette ambivalence :

« Il arrive cependant que la formalisation mathématique débouche sur un jeu stérile qui est à lui-même sa propre fin. »[3]

Mais on lit aussi dans le paragraphe suivant :

« Les grandes questions de l'écologie deviennent formalisables, et les mathématiques permettent de mieux saisir l'ensemble des implications, éventuellement contradictoires, de ces diverses formalisations. »[1]

---

[1] Cité par Jean-Paul Deléage *in* [Deléage, J.-P., 1991, 1994], *ibid.*, p. 177.
[2] [Deléage, J.-P., 1991, 1994], pp. 177-178.
[3] [Deléage, J.-P., 1991, 1994], p. 194.

Pour notre part, nous estimons que cette ambivalence des mathématiques du chaos à l'égard de la modélisation mathématique provient d'un malentendu répandu au sujet du regard que l'on doit avoir en général sur la mathématisation en science. Et ce malentendu a déjà été exprimé par nous précédemment, quoique dans un autre contexte. Il est dû à une divergence implicite mais fondamentale dans la façon de définir le comportement que l'on doit avoir vis-à-vis d'un modèle mathématique : le modèle mathématique doit-il être conçu comme le furent les premiers modèles de Maxwell et Boltzmann, c'est-à-dire de façon à se rendre compréhensibles les mathématiques ? Dans ce cas, on se méfiera des modèles mathématiques à comportement chaotique parce que justement ils nous déçoivent quant à cet objectif cognitif. C'est ce genre d'argument qui peut justifier la première phrase de Deléage, ci-dessus. Ou bien les modèles mathématiques doivent-ils se livrer à nous comme autant d'isomorphismes abstraits, sous la forme de schémas simplificateurs mais opérationnels, qui nous permettent de prédire et d'agir ? Sur ce point, les mathématiques du chaos ne déçoivent pas parce qu'elles vont jusqu'à donner l'impression qu'elles suivent le réel dans ses linéaments les plus imprévisibles, voire les plus contradictoires *a priori.* Et c'est bien plutôt dans cet esprit que Deléage écrit sa seconde phrase.

Giorgio Israel

Le mathématicien et historien des sciences italien Giorgio Israel a lui aussi travaillé sur la naissance de la modélisation mathématique à l'orée du 20ème siècle, après s'être penché sur les débuts de la mathématisation en économie politique au 18ème et 19ème siècle. Ses travaux sur la modélisation, d'abord publiés sous forme d'articles, ont été diffusés et popularisés dans deux ouvrages récents parus en français[2]. Selon cet auteur, la modélisation mathématique constitue bien une forme nouvelle de mathématisation dans les sciences, notamment dans ces sciences qui jusque là échappaient à la mathématisation telle qu'elle avait pu intervenir en physique depuis le 17ème siècle : les sciences humaines et les sciences du vivant. Or, pour bien saisir ce que ce type de mathématisation a de spécifique, il faut se persuader, selon cet auteur, qu'elle présente deux caractéristiques propres. Il les expose dès le début de son ouvrage de 1996 : le renoncement à l'idéal d'unification des méthodes et des savoirs scientifiques, d'une part, et le recours au modèle au seul sens d'analogie mathématique[3], d'autre part. Pour bien comprendre en quoi cette deuxième caractéristique distingue la modélisation mathématique des pratiques de mathématisation antérieures, il faut l'opposer au rôle que les mathématiques jouent en physique et particulièrement en mécanique. Pour ce faire, Israel s'appuie sur un texte de Jean-Marc Lévy-Leblond[4] dans lequel l'auteur s'interroge sur le lien étroit et spécifique qu'entretiennent physique et mathématiques. Ce dernier met en évidence ce qu'il appelle le rôle « constitutif » des mathématiques en physique. Il faudrait distinguer ce rôle de celui qui ne permettrait de concevoir les mathématiques que comme simple application ou comme outil d'expression ou de langage. La thèse de Lévy-Leblond est que les mathématiques ne sont pas seulement un langage pour la physique. Si tel était le cas, cela voudrait dire qu'il pourrait y avoir d'autres langages possibles pour la physique, et donc aussi un espace d'expression des concepts théoriques de la physique peut-être plus originel et qu'il faudrait ensuite traduire en langage mathématique. En effet, le rôle

[1] [Deléage, J.-P., 1991, 1994], p. 194.
[2] [Israel, G., 1996] et [Israel, G., 2000].
[3] [Israel, G., 1996], p. 11.
[4] [Lévy-Leblond, J.-M., 1982].

d'application ou de simple langage peut, pour sa part, rester toujours secondaire dans la science envisagée. Or, on voit bien que ce n'est pas le cas des mathématiques dans la physique, selon Jean-Marc Lévy-Leblond. Il écrit : « Les mathématiques sont ainsi intériorisées par la physique. »[1] Par la suite, après s'être réclamé de Bachelard pour expliciter ce rôle constitutif des mathématiques, il rectifie néanmoins l'interprétation kantienne que l'on pourrait faussement tirer de sa proposition :

« Le concept mathématique n'est ni un squelette auquel la physique prête chair, ni une forme abstraite que la physique emplirait d'un contenu concret : il est essentiel de penser le rapport des mathématiques à la physique en termes dynamiques. Plutôt que rapport de constitution, on devrait le penser comme rapport constituant. »[2]

Ce texte, assez éclairant donc, même s'il reste très vague sur la mathématisation proprement dite, permet non seulement de distinguer sur ce point la physique des autres sciences, mais également de faire apercevoir en quoi les disciplines frontières (comme « la chimie physique, la géophysique, la biophysique, etc. »[3]) peuvent se réclamer de la physique, indépendamment de leur objet spécifique. Ces disciplines peuvent en effet avoir été auparavant théorisées autrement que par un recours aux mathématiques physiciennes, comme c'est le cas en chimie, en géologie ou en biologie. Et une forme de mathématisation peut leur venir par leur marge. À la différence de Jean-Marc Lévy-Leblond, ce qui intéresse prioritairement Giorgio Israel concerne davantage les disciplines non physiques en elles-mêmes, directement en leur cœur, non les disciplines frontières : à savoir essentiellement l'économie et la biologie, c'est-à-dire les sciences non-exactes qui ont pu avoir recours aux mathématiques sans pour cela se réduire aux disciplines frontières qu'elles abritent cependant. Revenons à son propos principal.

Pour expliciter le sens de son constat historique, Israel part d'abord d'une caractérisation de la mathématisation propre à la mécanique classique. Il distingue significativement deux types de projets réductionnistes qui ont pu successivement affecter les transferts de méthodes et de concepts entre sciences exactes et sciences de la vie et de l'homme. Tout d'abord, le projet réductionniste a été calqué sur les « hypothèses métaphysiques » et épistémologiques qui ont si bien réussi à la mécanique de Galilée, puis de Newton et de Laplace. Selon notre auteur, ce

---

[1] [Lévy-Leblond, J.-M., 1982], p. 198.

[2] [Lévy-Leblond, J.-M., 1982], p. 199. C'est la seule allusion à Kant dans cet article qui, par ailleurs, choisit délibérément de ne pas rappeler l'origine kantienne de l'idée de « constitution » mathématique que pourtant il reprend à son compte et remet en honneur. Il est vrai qu'on n'a plus là tout à fait affaire au rapport de constitution tel qu'il a été pensé par Kant (ce dont témoigne le passage cité), et que cet article semble manifester la volonté de modifier le sens de ce terme par un recours au dialecticisme de principe de Bachelard. D'où le passage de l'idée d'une mathématique « constitutive » à celle d'une mathématique « constituante ». Mais pourquoi alors n'avoir pas choisi ce dernier terme, plus vague, dès le début de l'article si le premier prêtait à confusion à cause de la précision avec laquelle Kant l'avait utilisé ? Selon nous, en ne s'affrontant pas directement à la doctrine kantienne et à ses distinctions précises, ce texte reste très décevant car très vague dans sa thèse principale. Plus généralement, il est significatif que l'on ne puisse s'appuyer, à notre époque, que sur ce type de réflexions générales pour tâcher de penser la mathématisation dans les sciences. C'est en tout cas une preuve supplémentaire de la justesse du constat liminaire de Giorgio Israel (1996, p. 10) : les études historiques sur la mathématisation dans les sciences sont trop peu nombreuses. Nous ajouterions que les études épistémologiques le sont également, et cela notamment à cause de l'anti-kantisme persistant propre à la philosophie des sciences française contemporaine, comme nous aurons l'occasion de le mettre en lumière dans l'annexe B. S'il est vrai qu'il y a aujourd'hui un retour de la physique mathématique, notamment de par le développement récent de la modélisation mathématique et des mathématiques des systèmes dynamiques et du chaos, après l'hégémonie de la physique théorique au début du 20ème siècle, comme le confirme le livre d'Israel, l'épistémologie dialecticiste de Bachelard, fondée en son temps sur l'observation de la seule physique théorique, devrait être aujourd'hui fortement amendée pour nous permettre de penser les formes nouvelles de mathématisation qui interviennent dans cette « nouvelle » physique mathématique. Le dialecticisme n'y suffit plus.

[3] [Lévy-Leblond, J.-M., 1982], p. 208.

réductionnisme mécaniste s'appuyait en effet sur quatre hypothèses diversement conciliées entre elles : l'atomisme, le continuisme, le déterminisme et l'approche par cette partie des mathématiques que l'on appelle l'analyse[1]. Malgré le paradoxe qu'on pourrait y voir, il faudrait d'ailleurs interpréter le recours aux équations différentielles comme un continuisme associé à un atomisme, ce dernier permettant de construire le premier par un passage à la limite. C'est l'analyse mathématique qui permet une telle conciliation.

Le deuxième type de réductionnisme de la science classique serait intervenu plus tard, dans la théorie analytique de la chaleur de Joseph Fourier. Giorgio Israel affirme que l'on a encore affaire ici à un réductionnisme classique mais qui n'est cependant plus de nature mécaniste[2]. Israel s'explique ainsi le déplacement du réductionnisme mécaniste vers un réductionnisme de type analytique, c'est-à-dire qui ne sera plus inspiré que par l'analyse mathématique :

« Le véritable noyau de la méthode scientifique [depuis l'équation de Newton] est alors l'analyse mathématique, procédé qui, partant de l'étude empirique ou expérimentale des propriétés élémentaires d'une classe de phénomènes physiques, conduit à la formulation des équations différentielles qui les régissent. Par conséquent, le projet de 'donner une représentation mécanique de tout phénomène physique' devient celui de 'donner une représentation analytique de tout phénomène'. Le cœur de l'explication scientifique du monde n'est plus F = ma, mais l'idée que tout phénomène peut être ramené, 'réduit' à une équation différentielle. »[3]

Or ce changement de perspective n'implique pas du tout, selon notre auteur, que la vision unitaire du premier réductionnisme soit abandonnée : il n'y a donc pas véritablement lieu de faire commencer l'histoire de la modélisation mathématique avec Joseph Fourier. Même si, avec ces travaux, le noyau de concepts auxquels on veut réduire toute connaissance scientifique est plus large que précédemment, on doit toujours voir là une forme de réductionnisme puisque seule l'analyse mathématique y a droit de citer. C'est encore un réductionnisme au sens où l'on veut « ramener la description des faits à un système de principes et de méthodes considérées comme le noyau ontologique ou épistémologique de la science »[4]. L'exemple de l'approche de Fourier, en ce sens, tendra à maintenir l'hégémonie de l'analyse mathématique dans la physique comme dans les autres sciences qui voudront se mathématiser par la suite. Parce qu'il porte encore avec lui l'hypothèse déterministe, il pourra ainsi constituer un obstacle aux premiers essais de la mathématisation des phénomènes économiques et humains par le moyen du calcul des probabilités.

En toute logique, après l'exposé de ces rappels historiques, la thèse de Giorgio Israel consiste alors à soutenir que la mathématisation directe dans les sciences non-exactes a pu être longtemps ralentie (malgré l'ancienneté de l'arithmétique politique probabiliste de William Petty) du fait de ce privilège constamment accordé au déterminisme des équations différentielles[5]. Autrement dit, les origines de la modélisation mathématique seraient à percevoir dans ces premières tentatives de rupture avec le déterminisme classique intervenant dans les sciences humaines puis biologiques, entre le 17ème siècle et le 19ème siècle. Mais elles sont restées pour beaucoup des tentatives sans grand succès du fait de cette désaffection pour l'indéterminisme.

---

[1] [Israel, G., 1996], p. 77.
[2] D'où le fait que la méthode de Fourier ait pu être interprétée par certains auteurs comme une première forme de modélisation mathématique. Voir *supra*.
[3] [Israel, G., 1996], p. 149.
[4] [Israel, G., 1996], p. 149.
[5] [Israel, G., 1996], pp. 157-172.

Or, il se trouve que, selon notre auteur, cette situation a progressivement changé du fait de l'évolution qui affecta d'abord la physique elle-même. En effet, au début du 20ème siècle, la physique mathématique classique et déterministe a notamment connu les coups de boutoir de la physique quantique ; ce qui a, pour une part, contribué à la fin de l'hégémonie de la physique mathématique au profit de ce que l'on a appelé la physique théorique. Cette dernière, d'abord développée sous l'impulsion de la physique quantique, introduisait en effet la nécessité de recourir tant à des techniques mathématiques probabilistes qu'à un nouveau rapport à l'expérimentation. À la différence de la physique mathématique qui, pour sa part, recourait de façon plus abstraite[1] et détachée aux expériences, la physique théorique, en revanche, créait littéralement ses concepts sous la contrainte permanente de l'expérimentation[2]. C'est ce fondement quasi exclusif sur l'expérience précisément contrôlée qui caractérise la physique théorique. Par ailleurs, son émancipation à l'égard du seul formalisme différentiel et déterministe autorisait une grande souplesse et une grande diversification dans ses mathématisations. Ce faisant, et en retour, les pratiques expérimentales qui lui étaient étroitement affiliées gagnèrent assez paradoxalement en capacité d'autonomie et d'initiative[3]. On peut s'expliquer ce fait paradoxal si l'on songe qu'une théorie plus souple, et pourvue de formalismes moins conditionnés par des *a priori*, détermine moins étroitement l'expérimentation et ses modalités, même si en même temps elle se fonde toujours plus profondément sur elle. Précisons d'ailleurs ici, que le travail de Peter Galison, dont il sera question plus bas, a justement confirmé cette autonomisation croissante de la pratique expérimentale dans la physique théorique au cours du 20ème siècle[4].

Par la suite, toujours selon Giorgio Israel, le fait que le choix des formalismes mathématiques ait été moins déterminé qu'auparavant par des *a priori* ontologiques et épistémologiques s'est lui-même vu renforcé par le développement contemporain, en ce début du 20ème siècle, de l'approche axiomatique et formelle de tous les secteurs des mathématiques, cela sous l'impulsion des travaux de Hilbert et de ses critiques, comme de ses successeurs. Le bourbakisme en France, par exemple, est issu de cette volonté de ne considérer les mathématiques que comme un « réservoir

---

[1] Nous dirions même « intuitive *a priori* », par référence à la théorie de la connaissance kantienne développée dans la *Critique de la raison pure*, notamment au spectacle des succès newtoniens.

[2] [Israel, G., 1996], p. 185. Les travaux épistémologiques de Gaston Bachelard (voir surtout [Bachelard, G., 1940, 1983], [Bachelard, G., 1949, 1962] et [Bachelard, G., 1951, 1965]) ont pu, en leur temps, paraître innovants dans l'exacte mesure où ils faisaient pertinemment prendre conscience de ce nouveau rapport très étroit (« dialectique », pour reprendre les termes de Bachelard) entre expérimentation et conceptualisation qu'inaugurait la nouvelle physique théorique du début du 20ème siècle. C'est donc du fait que, dans ce cas particulier, on n'avait effectivement plus affaire à une physique mathématique, comme c'était auparavant le cas en mécanique classique, que l'épistémologie kantienne a pu sembler définitivement dépassée et que le recours à la construction *a priori* de concepts ait pu sembler tout à fait mystique à Bachelard comme à ses successeurs néo-hégéliens ou néo-marxistes. Nous sommes là, une fois encore, devant le cas d'une épistémologie générale construite opportunément au regard d'un certain état historique d'un certain secteur de la science (la physique théorique) et qui a pu abusivement être déployée et généralisée à d'autres secteurs où pourtant le régime de la conceptualisation et de la mathématisation était tout autre. Avec le recul que nous procure l'histoire des sciences, on aperçoit aujourd'hui combien cette généralisation était abusive. Car comme l'histoire des sciences l'indique avec une certaine ironie, il serait désormais faux de prétendre que cette épistémologie, dont on sait aujourd'hui combien elle est datée et située (et qui a pu conséquemment se présenter comme dialectique à bon compte), ait une applicabilité universelle dans les sciences contemporaines, même si elle vaut encore, dans une certaine mesure, pour la micro-physique théorique. Ce dernier constat nous pousse de nouveau à reconnaître, si besoin était, combien l'épistémologie elle-même partage somme toute assez logiquement avec ce qui constitue son objet d'étude propre ce destin d'appartenir à une « histoire jugée », ainsi que Bachelard l'avait d'abord pensé pour la science seule.

[3] [Israel, G., 1996], p. 188.

[4] Israel (1996) a publié avant Galison (1997) ; et Galison, de son côté, ne semble pas avoir connu les travaux d'Israel, comme cela transparaît dans la bibliographie de [Galison, P., 1997] : le nom d'Israel n'y figure pas. On serait donc là devant le cas d'une convergence entre les résultats de deux problématiques historiques d'abord autonomes ; ce qui tend, selon nous, à accroître raisonnablement leur crédibilité.

de formes abstraites »[1] non nécessairement liées à des intuitions sensibles, mais élaborées en revanche très rigoureusement dans des axiomatiques précises.

Dès lors, selon notre auteur, les conditions sont réunies pour que le privilège de l'analogie mécanique laisse assez rapidement la place, en physique, à celui de l'analogie directement mathématique. C'est la figure de von Neumann qui manifesterait le plus clairement cette prise de conscience du fait que, selon lui, on peut désormais se passer des croyances en la causalité du réel ou en l'objectivité des modèles mathématiques que l'on utilise, croyances qui contraignaient bien trop et bien inutilement les formalismes précédents. Pourtant, selon Giorgio Israel, les positions de von Neumann, qui tendaient à représenter les mathématiques comme un réservoir de « schémas logiques et déductifs », font encore de lui un tenant d'une forme nouvelle de réductionnisme (une troisième forme), ce que notre auteur appelle un « néo-réductionnisme ». Le réductionnisme de von Neumann aurait en effet consisté en une sorte de préférence de principe pour la traduction de toute représentation scientifique en un mécanisme formel. Son travail sur les automates formels, par exemple, confirmerait cette analyse. Par ailleurs, comme le rappelle Israel, von Neumann était fermement hostile à l'usage de processus stochastiques dans les modèles mathématiques du vivant. Comment Israel s'explique-t-il ce qui a pu convaincre von Neumann au point que ce dernier en vienne à tenir une telle position épistémologique ? Selon Israel, la mathématisation par l'axiomatisation mathématique apparaît très puissante à von Neumann car elle permet de lisser[2] toute difficulté épistémologique en transformant, dès le départ, tout principe physique en un simple axiome. Or, depuis les développements des mathématiques remontant à la fin du siècle précédent, l'axiome ne passe plus pour une thèse ou un postulat mais seulement pour un essai de représentation n'ayant aucune prétention à l'objectivité ontologique. Il faudrait donc rapporter ce nouveau réductionnisme non pas à une ontologie mais, au contraire, à la conviction philosophique néo-positiviste selon laquelle la science n'aurait définitivement plus pour objet d'expliquer mais seulement de décrire. On assisterait là à une valorisation supplémentaire du formel aux dépens du sens et de la signification dans les représentations scientifiques[3].

Pour notre part, nous nous devons de signaler ici que les travaux de Peter Galison semblent montrer, au contraire, que, dans le cadre de la fabrication des premières bombes nucléaires, von Neumann, ou, en tout cas, ses proches collaborateurs, ont joué un rôle essentiel dans l'introduction de l'approche stochastique en physique nucléaire, notamment avec les premières simulations numériques. Il est vrai cependant que le contexte n'était pas le même que celui qui intéressa plus tard von Neumann, en biologie, lorsqu'il se pencha sur le problème des automates auto-reproducteurs. En ce qui nous concerne, nous ne sommes pas à même de décider lequel des deux historiens des sciences est le plus fidèle à la perspective réelle de von Neumann. Sans doute von Neumann ne possédait-il pas en fait de position épistémologique univoque quels que soient les domaines, si divers, qu'il ait pu aborder. Mais sans vouloir en décider ici, nous nous contentons prudemment de signaler cette relative discordance entre deux interprétations historiques existantes[4]. En ce qui concerne son collègue Ulam, toutefois, nos propres travaux montrent que le

[1] [Israel, G., 1996], p. 195.
[2] Israel utilise le verbe « exorciser ». Voir [Israel, G., 1996], p. 198.
[3] [Israel, G., 1996], p. 200.
[4] Si l'on tient toutefois à donner raison à Israel, on peut s'appuyer sur un passage d'un article de M. Cini ("The Context of Discovery and the Context of Validation : the Proposals of von Neumann and Wiener in the Development of 20th Century Physics", *Rivista di storia della scienza*, 1985, vol. 2, n°1, pp. 108-109,) qu'Israel cite plus loin dans son livre : « [Dans la conception de von Neumann,] même le hasard peut rentrer dans un schéma purement logique et peut être vu comme la manifestation de lois définies, générales et atemporelles. Dans la théorie de la mesure de von Neumann le temps a disparu […] Tout ce qui appartient au monde est donc réduit à une sphère de la légalité logico-mathématique », [Israel, G., 1996], p. 226, note 1.

recours à l'aléatoire ne lui paraissait ni interdit ni réellement significatif ou décisif. Le caractère stochastique de certains modèles (les simulations de Monte-Carlo) lui semblait purement contingent et de peu de valeur en soi. Il ne lui paraissait pas du tout aussi décisif que leur faculté de simuler spatialement la réalité ou de modéliser physiquement des problèmes mathématiques.

Quoi qu'il en soit, selon Israel, cette dernière forme de réductionnisme (qui, ajoutons-le, n'a cependant pas peu fait pour le développement de certains formalismes déterministes dans les sciences de la vie[1]) peut sembler avoir été aujourd'hui doublée et quelque peu disqualifiée par un certain retour de la physique mathématique sur la scène de la mathématisation en physique. Depuis les années 1960, la théorie qualitative des équations différentielles a en effet connu un regain d'intérêt avec la prise en compte accrue des phénomènes de non-linéarité, de complexité et de chaos déterministe. La description qualitative et globale, qui autorisait déjà une émancipation à l'égard de l'analyse au profit d'un certain retour de la géométrie[2], n'a donc plus seulement été le fait de l'approche axiomatique et néo-mécaniste telle que l'avaient proposée des chercheurs comme von Neumann. Les anciens formalismes, comme ceux de l'analyse (pour peu que l'on ne simplifie plus les expressions différentielles en considérant, à tort, que les termes non-linéaires peuvent être négligés[3]), pouvaient donc être réhabilités et utilisés, mais, cette fois-ci, dans le cadre de ce modélisme mathématique globaliste en plein essor.

Pour conclure sur ce qu'il ne présente que comme une ébauche d'une histoire générale de la modélisation mathématique encore à écrire, Giorgio Israel indique qu'il ne faudrait plus désormais arrimer une telle histoire à la seule histoire des formalismes mathématiques intervenant dans la physique, mais qu'il faudrait considérer que les mathématiques appliquées constituent une véritable discipline autonome, liée aux mathématiques et particulièrement dédiée à la modélisation mathématique[4].

Dans la troisième partie de son ouvrage, l'auteur se propose pour finir de présenter quelques « tensions essentielles » qui semblent, selon lui, animer l'histoire récente de la modélisation mathématique. C'est à Thomas Kuhn qu'il doit cette expression. Ce dernier voulait désigner par là le conflit permanent, dans l'histoire des sciences, entre la tradition et la tendance à l'innovation. Dans cette dernière partie, Giorgio Israel ne procède donc plus de façon chronologique et présente simplement un certain nombre de couples de notions antagonistes censées avoir animé et ordonné les développements récents de la modélisation : mathématique statique et mathématique du temps, local et global, déterminisme et hasard, ordre et chaos, complexité et simplicité, mathématique « quantitative » et mathématique « qualitative », modèle mécaniste et modèle mécanique (pour la modélisation en biologie), empirisme et métaphore (pour la modélisation en économie). Selon Israel, la relative permanence de ces couples témoignerait de la récurrence de certaines options philosophiques, métaphysiques, donc pas seulement épistémologiques, dans l'histoire de la modélisation et dans l'histoire des sciences en général.

Dans le chapitre qui concerne le conflit entre mathématique statique et mathématique du temps, Israel explique et montre combien les travaux de von Neumann en économie, avec son application de la théorie des jeux à l'hypothèse de l'équilibre général, n'ont finalement que pris la suite de l'approche réductionniste et mécaniste traditionnelle dans ce domaine. En effet, en

[1] Nous pensons ici aux premiers travaux du biologiste théoricien Aristid Lindenmayer. Voir *supra*.
[2] [Israel, G., 1996], pp. 189-190.
[3] [Israel, G., 1996], pp. 204-205.
[4] Ce dont témoigne en France, par exemple, les travaux de Nicolas Bouleau et de ses collaborateurs. Voir [Bouleau, N., 1998].

centrant les procédures formelles sur l'éviction des processus temporels au profit de la recherche de points fixes, von Neumann n'analyse pas la forme réelle des processus. Israel pense qu'il faut attendre les travaux du mathématicien américain Stephen Smale, dans les années 1960, pour que la physique elle-même cherche à renouer avec ce que ce dernier appelle les « mathématiques du temps », c'est-à-dire avec « la représentation dynamique des phénomènes en tant que 'processus' qui se déroulent au cours du temps »[1]. Ce serait notamment le développement des calculs sur ordinateur, le regain d'intérêt pour les phénomènes hydrodynamiques de turbulence, et, plus généralement, pour la météorologie, avec les travaux d'Edward Lorenz, qui auraient été parmi les principaux facteurs d'un renouveau de la physique mathématique et des équations différentielles ordinaires. Dans le chapitre suivant sur « local et global », notre auteur affirme en outre que l'influence de la mécanique classique sur la modélisation mathématique est bien plus forte que celle de la physique moderne[2]. En effet, même si l'approche mécaniste de la première physique mathématique est localiste au sens où elle est constructive des concepts qu'elle emploie, cela de par ses outils analytiques et différentiels, sa perspective métaphysique est restée néanmoins globaliste comme souvent dans la modélisation mathématique. Ainsi, à la différence de ce qui se produit dans la théorie physique de la relativité par exemple, « les conceptions d'espace et de temps qui interviennent dans la modélisation mathématique ont presque toujours un caractère très traditionnel »[3]. Ainsi en est-il également pour les approches en plein essor par l'analyse globale au moyen des espaces de phase. Pour ce qui concerne la tension essentielle entre déterminisme et hasard, Israel indique que les probabilités elles-mêmes ont d'abord été définies dans un contexte laplacien, c'est-à-dire à partir d'un point de vue purement déterministe : dans ce cadre-là, on présentait prudemment le calcul des probabilités comme « une méthode de perturbation de l'analyse objectiviste »[4]. La modélisation mathématique, en ne se présentant pas d'emblée comme une perspective objective sur les phénomènes, n'aurait, en revanche, pas eu à faire face aux obstacles métaphysiques qu'une interprétation objectiviste de l'aléatoire avait auparavant régulièrement rencontrés, dans les diverses tentatives antérieures de mathématisation des sciences non-exactes. Mais, même si la modélisation semble pouvoir réduire de telles questions à de simples choix de « styles » formels et semble se présenter comme un champ pacifié de pratiques et de formalismes, opposées mais cohabitant cependant en bonne intelligence, ces « styles », précise Israel, « représentent l'adhésion à des options philosophiques que le milieu aseptisé de la modélisation peut atténuer mais non pas annuler »[5].

Israel en arrive alors à une idée qui lui tient à cœur : avec son apparent renoncement à représenter au plus près le réel et sa capacité à s'en tenir à la seule analogie mathématique, la modélisation mathématique aurait pour effet de menacer les croyances qui étaient jusque là au fondement de la science, en particulier celle qui concerne la nécessité du déterminisme, mais aussi et surtout celle qui voulait voir en l'idéal de la science autre chose qu'un ensemble de langages donnant « du monde des images subjectives »[6]. Selon notre auteur, il y aurait en fait, au cœur de toute entreprise de modélisation, une sorte de mauvaise foi originelle. Celle-ci tiendrait principalement en une contradiction entre la modestie affichée publiquement concernant le choix du formalisme ou du style formel et la conviction souvent irrépressible, de celui qui manifeste ce

[1] [Israel, G., 1996], p. 230.
[2] [Israel, G., 1996], p. 235.
[3] [Israel, G., 1996], p. 235.
[4] [Israel, G., 1996], p. 245.
[5] [Israel, G., 1996], p. 251.
[6] [Israel, G., 1996], p. 253.

détachement, de tenir là une expression plus objective du réel que ses concurrents[1]. Par la suite, dans son chapitre sur mathématique « quantitative » et mathématique « qualitative », notre auteur revient sur le rôle important qu'a joué, selon lui, l'ordinateur, dans l'évolution de cette « tension essentielle » particulière. Avec l'ordinateur, l'analyse qualitative a pu s'effectuer en même temps que l'analyse numérique, comme dans une sorte de prolongement naturel, de par le développement des moyens techniques de visualisation des résultats de calcul :

« Jusque dans les années 1970, rien dans la recherche ne signale une modification du statut de l'analyse numérique subordonnée à la recherche des solutions approchées des problèmes classiques de l'analyse. Ce qui a déterminé un changement radical, ce n'est pas seulement l'augmentation de la vitesse de calcul des ordinateurs – bien que la vitesse d'un calculateur électronique des années 1960 paraisse ridicule par rapport à celle de n'importe quel ordinateur personnel actuel. Le changement profond est venu de l'introduction des techniques de représentation graphique dans de nombreux problèmes mathématiques. L'ordinateur possède aujourd'hui un écran, tout à fait semblable à celui d'une télévision, capable non seulement d'afficher des mots et des chiffres, mais aussi de réaliser des dessins sous nos yeux. Beaucoup de problèmes mathématiques trouvent ainsi une représentation directe ; non seulement des problèmes proprement géométriques, qui peuvent maintenant être dessinés avec une précision jusqu'alors inconnue du chercheur qui les traçait péniblement sur une feuille, mais aussi des problèmes algébriques et analytiques qui s'expriment aujourd'hui sous une forme graphique. »[2]

Ainsi l'ordinateur peut prêter à ce que Giorgio Israel appelle des « expérimentations mathématiques »[3] dont la crédibilité fluctue et reste même douteuse pour nombre de chercheurs, d'autant plus qu'aujourd'hui, à la différence des premiers développements de l'analyse numérique sur ordinateur pour lesquels les programmes informatiques étaient accessibles et publiables, plus personne n'est capable de préciser intégralement les cheminements numériques suivis par les logiciels de plus en plus complexes, qui fonctionnent donc parfois comme autant de boîtes noires aux yeux de l'analyste.

Enfin, dans ses deux derniers chapitres, Giorgio Israel évoque successivement quelques thèmes qui traversent l'histoire de la modélisation en biologie puis en économie. En ce qui concerne la modélisation en biologie, tout d'abord, il y aurait quatre secteurs qui auraient plus particulièrement donné lieu à une mathématisation *via* la modélisation. Ce sont les secteurs propres à la biologie mathématique : dynamique des populations, génétique des populations, théorie mathématique des épidémies et « modélisation mathématique de la physiologie et de la

[1] Israel exprime ce doute à plusieurs reprises, notamment p. 257 : « La pensée néopositiviste a voulu bâtir une image de la science, qui est parfaitement légitime mais qui présente deux défauts : elle ne correspond pas à l'histoire de la science et elle ne s'accorde pas avec ce que pensent les savants militants . Au fond de leur âme, ils restent objectivistes et réalistes […] En réalité, [dans le cas du dualisme ordre-chaos,] comme dans le cas du dualisme déterminisme-hasard, la modélisation mathématique n'a jamais été totalement agnostique et pragmatique » ; et p. 265 : « Encore une fois, c'est l'idée de la *science comme un langage*, dont la modélisation mathématique représente l'expression la plus développée. Ce point de vue est intéressant et présente peut-être des bases solides. Pour ce qui nous concerne, nous le trouvons même fascinant. Mais il faut bien voir à quoi cela mène : à la destruction pure et simple de l'idée classique de science, de ce qui a fait qu'on l'a considérée comme un savoir à part et supérieur aux autres formes de connaissance – et cela parce qu'elle atteignait une connaissance objective et indiscutable. Les savants qui se réclament d'un point de vue modéliste et annoncent la mort des concepts d'ordre, de loi naturelle, d'objectivité, sont-ils prêts à franchir ce pas ? Ou plutôt se rendent-ils compte qu'ils l'ont déjà fait ? »

[2] [Israel, G., 1996], p. 294.

[3] [Israel, G., 1996], pp. 295-296.

pathologie des organes ou des processus du corps humain »[1]. Le dernier secteur serait à mettre à part selon notre auteur, dans la mesure où il a pu présenter un certain nombre de modèles relativement indépendamment du réductionnisme mécaniste qui régnait par ailleurs. Ainsi le modèle de Van der Pol pour les battements du cœur est affranchi de tout recours à une analogie mécanique préalable : il s'agit de la mise en œuvre directe d'une analogie mathématique.

Pour finir sur le travail de Giorgio Israel, il nous faut en venir à l'idée principale qu'il en tire finalement lui-même, suivant en cela l'épigraphe de son livre elle-même extraite d'un ouvrage du kabbaliste Gershom Scholem : la « science est un des multiples langages qui inondent le monde »[2]. Pour notre auteur, un modèle est donc toujours une forme de langage. Selon nous, il rejoint là explicitement une option ontologique et, par voie de conséquence, épistémologique, majoritaire dans la seconde moitié du 20ème siècle, et dont nous tâcherons de suivre la naissance et les avatars dans notre annexe sur l'histoire de la philosophie des modèles en France. Indiquons seulement ici que nous qualifions cette option de « linguisticiste » car elle ne veut concevoir toute pratique scientifique qu'à l'image de cette pratique particulière de l'homme qu'est le langage. Or, nous aurons l'occasion de discerner les raisons précises pour lesquelles une telle épistémologie anthropomorphe n'est plus tout à fait à même d'interpréter l'émergence actuelle de la simulation informatique dans l'histoire récente des modèles. Mais pour rester dans le cadre de cet état des lieux en histoire, poursuivons notre extraction des acquis en histoire récente des modèles.

Peter Galison

Avec un grand souci du détail et de l'érudition, le physicien et historien des sciences américain Peter Galison a récemment retracé l'histoire de la naissance de la simulation numérique telle qu'elle est intervenue, à Los Alamos, d'abord dans le cadre du projet de fabrication de la première bombe nucléaire, puis, de façon plus systématique encore, lors de la conception de la première bombe thermonucléaire. Galison nous intéresse ici tout particulièrement parce qu'il s'est longuement penché sur l'histoire de la simulation dont nous montrons, dans notre travail, combien elle est décisive dans l'histoire récente de la formalisation des plantes.

À la suite des travaux de Thomas Kuhn et des post-kuhniens, sa perspective d'historien contemporain part du constat, assez consensuel dans les années 1980, selon lequel la science et les méthodes scientifiques[3] actuelles manifesteraient une certaine désunification. Mais pour ce qui le concerne, Peter Galison tient à montrer que ce fait indéniable ne nous détermine pas pour autant à en venir à une épistémologie purement relativiste. Dans son article de 1996, intégralement consacré aux premières simulations numériques en physique nucléaire, il soutient ainsi, et de façon apparemment paradoxale, que c'est seulement par une interprétation sociologique de type « constructivisme social » qu'il reste possible de comprendre l'unité de la méthode de la science et de ses développements. Rappelons ici comment et à l'aide de quels concepts il lève ce paradoxe. Ce faisant, nous comprendrons de quelle manière il est possible à cet historien contemporain de concevoir et d'interpréter le caractère plurivalent de cette nouvelle pratique scientifique qu'est la simulation numérique.

Après avoir insisté, dans son premier livre[4], notamment à la suite de l'impulsion donnée par Ian Hacking[1], sur la nécessité pour l'historien des sciences de rendre compte de l'histoire de

[1] [Israel, G., 1996], p. 301.
[2] [Israel, G., 1996], p. 334.
[3] [Galison, P., 1996], p. 118.
[4] [Galison, P., 1987].

l'expérimentation et des appareils expérimentaux sans en passer toujours prioritairement à travers le filtre de l'histoire des théories, Galison s'est trouvé face à la difficulté de penser le statut épistémologique de la simulation numérique en termes de théories ou d'expérimentation : dans le cas de l'émergence de la simulation numérique, fallait-il raconter la naissance d'un calcul ou d'une pratique expérimentale ? C'est donc parce qu'auparavant il s'était situé délibérément dans ce cadre problématique (favoriser une approche de l'histoire des sciences par l'histoire des instruments et des expérimentations) que Galison devint particulièrement sensible à ce problème auparavant négligé par les historiens de la physique nucléaire. Et c'est dans le cadre de cette interrogation qui lui est propre qu'il forge une notion par laquelle il se propose de désigner une forme nouvelle d'activité scientifique. Pour appuyer sa thèse et afin de régler le problème du statut de la simulation numérique, Galison introduit en effet la notion de « zone transactionnelle » - « *trading zone* ». Une « zone transactionnelle » est une zone d'activités scientifiques intermédiaires sans objet bien défini et située au carrefour entre des disciplines scientifiques plus académiques et aux objets reconnus. Selon ses propres termes, c'est « une arène dans laquelle des activités radicalement différentes peuvent être coordonnées *localement* mais non globalement »[2]. L'étude de l'histoire de la simulation numérique serait donc exemplaire de ce mode local et nouveau de croisements, d'échanges et de traductions entre des activités scientifiques hétérogènes. Elle témoignerait d'un « assemblage chaotique de disciplines »[3]. Nous allons rapidement indiquer ici la teneur des arguments et des résultats de Galison à ce sujet.

Dans son article de 1996, Peter Galison rappelle d'abord que la méthode de simulation numérique a été mise en œuvre non seulement parce qu'aucune discipline traditionnelle ne pouvait à elle seule prendre en charge de telles investigations, mais surtout parce que la conception d'une bombe thermonucléaire exigeait d'une part des expérimentations soit infaisables, soit beaucoup trop exigeantes en termes de précision dans la mesure et dans l'évaluation de la masse critique, et d'autre part, enfin, conduisait rapidement à des théories mobilisant des équations intégro-différentielles insolubles. C'est donc en toute conscience que Stanislaw Ulam, Enrico Fermi, John von Neumann et Nicholas Metropolis ont conçu le projet d'avoir recours aux calculateurs numériques pour recomposer une « réalité artificielle », selon les termes mêmes de Galison[4] :

« Où la théorie et l'expérience échouaient, une sorte de modélisation numérique était nécessaire, et là rien ne pouvait remplacer le calculateur prototype qui venait juste d'entrer en fonction à la fin de l'année 1945 : l'ENIAC (Electronic Numerical Integrator And Calculator). »[5]

Galison rapporte alors la teneur des propos de von Neumann par lesquels celui-ci légitimait le recours à une telle modélisation discrète et stochastique. Son argument consistait à inverser la vision traditionnellement répandue au sujet des équations intégro-différentielles utilisées en hydrodynamique. Selon von Neumann, ce sont elles qui doivent être accusées de distordre le monde réel puisqu'elles se présentent comme des descriptions continuistes alors que l'on

---

[1] [Hacking, I., 1983, 1989].
[2] [Galison, P., 1996], p. 119.
[3] [Galison, P., 1996], p. 119.
[4] [Galison, P., 1996], p. 120.
[5] [Galison, P., 1996], p. 122 : "Where theory and experiment failed, some kind of numerical modeling was necessary, and here nothing could replace the prototype computer just coming into operation in late 1945 : the ENIAC (Electronic Numerical Integrator And Calculator)".

considère « en réalité »[1] un ensemble discret de molécules. Bien sûr l'ordre de grandeur réel du nombre des molécules n'est pas conservé dans la « réalité artificielle », mais, dans ce type de problème, ce sont surtout les proportions numériques et les localisations relatives qui jouent un rôle. Ainsi ce modèle numérique, dit de Monte-Carlo[2], faisant intervenir un traitement pas à pas et individualisé des molécules, doublé d'un tirage de nombres pseudo-aléatoires réglant leurs comportements respectifs, passe-t-il, aux yeux d'un de ses promoteurs principaux (von Neumann), non plus pour un calcul mais pour une simulation au même titre que les simulations analogiques d'usage fréquent et plus ancien dans de nombreuses disciplines. Nicholas Metropolis et Stanislaw Ulam confirment par la suite les propos de von Neumann en ajoutant que la simulation numérique s'impose dans la résolution de problèmes à échelle intermédiaire, c'est-à-dire ne pouvant être traités ni au niveau de la mécanique classique analytique ni non plus à celui de la physique statistique où la loi des grands nombres permet des globalisations, ou agrégations, dans les calculs. Or, selon Ulam cette échelle « mésoscopique »[3] est notamment celle qui concerne déjà prioritairement cette partie des mathématiques que l'on appelle l'analyse combinatoire. La technique de simulation Monte-Carlo, utilisée d'abord dans la modélisation des processus de diffusion et de réaction des neutrons, s'avère d'application plus large car le type de problème qu'elle résout n'est pas spécifique à la seule physique. On peut tout aussi bien considérer cette méthode comme une méthode d'exploration empirique des mathématiques elles-mêmes. Et c'est là que se manifeste au grand jour la plurivalence de la simulation numérique. Afin d'expliciter davantage cette caractéristique, Peter Galison distingue assez précisément les différentes séries d'arguments en faveur de l'interprétation de la simulation numérique comme expérience ou comme calcul. Et c'est seulement après cet exposé historique (où se mêlent donc l'histoire des sciences et l'histoire des épistémologies des scientifiques) qu'il propose sa propre interprétation épistémologique.

Selon notre auteur, il faut distinguer différents niveaux d'interprétation lorsque l'on s'interroge sur le statut de la simulation. Il y a d'abord le niveau épistémique dans lequel on considère principalement les modalités techniques de traitement de la simulation. Ces modalités sont-elles plus proches de celles de l'expérience ou de celles du calcul ? Il apparaît en fait très vite que la simulation exige, aux yeux de celui qui la pratique, les mêmes traitements techniques que l'expérience : elle demande qu'on se préoccupe des erreurs, de leur suivi mais aussi des techniques de réduction de la variance, puis de la localité, de la répétabilité et de la stabilité du résultat. Toutes ces caractéristiques justifient le fait que l'on puisse parler d'« expérimentation mathématique » selon Herman Kahn, alors employé à la *Rand Corporation*[4]. En outre, le même Herman Kahn va jusqu'à penser que la simulation peut se substituer désormais à l'expérimentation puisqu'elle se présente comme un corrélat plus fiable pour la théorie. En effet, dans une approche de type Monte-Carlo, on est certain de contrôler totalement les données physiques et les hypothèses alors que ce n'est pas le cas pour une expérimentation réelle. Cela a pour conséquence de rendre immédiatement testable la théorie. Et l'expérimentation réelle semble pouvoir être détrônée sur ce point. Au vu de ces arguments, Galison affirme que toutes les assimilations de la simulation à l'expérience dont les arguments sont de cet ordre, sont bien de nature épistémique. C'est-à-dire que les traitements techniques cités plus haut interviennent tous

[1] Selon les termes mêmes de von Neumann, précise Galison. Voir [Galison, P., 1996], p. 125.
[2] Galison rapporte que cette dénomination aurait été pour la première fois proposée – et publiée en 1949 - par Nicholas Metropolis, en référence à la ville de Monaco bien connue pour ses casinos et le libre accès qu'on y donne aux jeux de hasard.
[3] Selon le terme même de Galison : "mesoscopic *terra incognita* ", [Galison, P., 1996], p. 126.
[4] [Galison, P., 1996], p. 142.

au titre de moyens « par lesquels les chercheurs peuvent argumenter en faveur de la validité et de la robustesse de leurs conclusions »[1]. Et l'essentiel des arguments avancés se fonde bien sur le fait que la nature des moyens mobilisés pour insérer le résultat d'une expérience dans le réseau des arguments est la même lorsqu'il s'agit d'une simulation numérique.

Cependant, il existe un deuxième niveau d'interprétation en ce qui concerne le statut épistémologique de la simulation numérique : le niveau métaphysique, dans lequel on considère la conformité de cette nouvelle forme de représentation à la réalité sous-jacente supposée. Selon les mots de Galison, les méthodes de Monte-Carlo deviennent, dans cette perspective, autant d'« enquêtes » ontologiques semblant appartenir de plein droit aux discours traditionnels de la philosophie naturelle censés porter sur la véritable nature des choses. Ainsi, par exemple, le chimiste Gilbert King accentue encore l'argument de von Neumann en qualifiant les équations différentielles d'abstractions au regard des « modèles réalistes » que constituent pour lui les simulations numériques. Ces modèles sont plus réalistes car ils offrent des simulacres parfaits de la réalité étant donné qu'à un niveau élémentaire, la réalité se présente, selon King, sous une forme discrète et stochastique. Galison qualifie cette attitude ontologique de « stochasticisme »[2]. Elle est à opposer diamétralement à une forme de platonisme qui voudrait voir en l'équation différentielle l'incarnation d'Idées mathématiques continuistes ordonnant le monde abstraitement et de façon sous-jacente. Selon notre auteur, pour Herman Kahn comme pour Gilbert King, « le processus de diffusion est imité par le processus stochastique »[3]. L'ordinateur imiterait donc la réalité plus qu'il n'effectuerait un calcul ou une résolution numérique approchée. C'est lui qui serait plus réaliste que ne le sont les modèles mathématiques continuistes. Selon cette perspective, de telles représentations mathématiques sont secondes et devraient être remplacées dès lors qu'une simulation devient envisageable. La simulation par Monte-Carlo peut être alors considérée comme une modélisation mathématique d'un nouveau genre : une modélisation « directe » du phénomène physique, car ne faisant pas intervenir d'équations fonctionnelles à titre d'intermédiaires[4].

Galison évoque ensuite un troisième et dernier niveau d'interprétation pour le statut de la simulation : le niveau pragmatique selon lequel on doit plutôt considérer que les méthodes de Monte-Carlo se limitent à modéliser les processus stochastiques intervenant dans la représentation mathématique mais pas le processus de diffusion lui-même. La simulation serait donc une technique mathématico-mathématique, une recette mathématique opérant de façon interne aux formalismes mobilisés. Elle n'aurait donc pas le statut d'une représentation directe du réel. Parmi les tenants d'une telle interprétation, on retrouve des chercheurs qui, comme le mathématicien de Princeton, John Tukey, ou comme le mathématicien de Cornell, Mark Kac, tiennent à assurer que la simulation n'est qu'une méthode heuristique voire un pis-aller auquel on a recours dans les cas où aucune autre solution ne se présente, mais auquel il faudrait bien vite renoncer dès lors qu'une mathématisation alternative se proposerait. De façon générale, selon

[1] [Galison, P., 1996], p. 143.
[2] [Galison, P., 1996], p. 146.
[3] [Galison, P., 1996], p. 147.
[4] [Galison, P., 1996], p. 148. Il est intéressant de remarquer que, pour sa part, lorsque le mathématicien et modélisateur français, Nicolas Bouleau (1999), parle de mathématisation directe, il désigne indistinctement toutes les nouvelles formes de modélisation mathématique, voulant dire par là qu'elles peuvent désormais se dispenser de tout recours préliminaire aux théories propres aux domaines de l'objet modélisé. Autrement dit, est directe, pour Bouleau, toute mathématisation qui peut s'affranchir d'une thèse ontologique ou théorique sur la nature du réel. Il nous semble en revanche, que, dans le passage qui nous occupe ici, Galison s'en tienne à l'idée d'une modélisation directe au sens d'une modélisation mimétique, donc nécessairement assise sur une représentation ontologique particulière, et non pas à l'idée d'une mathématisation directe au sens de Bouleau. Cette dernière, en effet, ne se caractérise pas du tout par un formalisme mimétique, mais au contraire par un renoncement - supposé émancipateur - à toute thèse ontologique. Elle se fonde sur un retrait dans la pure phénoménologie de l'objet modélisé.

cette interprétation, la simulation est apparentée à un simple procédé de résolution numérique et calculatoire. La forme extrême que peut prendre ce niveau pragmatique d'interprétation a été notamment illustrée par les prises de position de deux spécialistes de mathématiques appliquées. Pour John Hammersley et Keith Morton, le fait de recourir à des éléments aléatoires dans les modèles mathématiques est une véritable hérésie à laquelle se livrent de façon coupable certains de leurs collègues des mathématiques théoriques. Selon les chercheurs en mathématiques appliquées, leurs collègues feraient mieux de travailler à parfaire les résolutions analytiques des équations différentielles complexes. En effet, ce qui gêne les spécialistes de mathématiques appliquées, en l'occurrence, c'est le fait que l'on ne puisse pas s'appuyer sur des résultats fiables, c'est-à-dire déterministes, susceptibles de rendre compte des lois physiques, dès lors que l'on fait intervenir des processus stochastiques.

Face à ces désaccords profonds au sujet de la nature de cette nouvelle activité scientifique, l'historien Galison est à même de se poser deux questions : comment s'expliquer le fait qu'elle ait malgré tout résisté ? Et comment même s'expliquer son continuel essor depuis lors ? On aurait pu craindre en effet que cette activité finisse par perdre tout à fait de son crédit du fait de cette cacophonie interprétative. Ce qui est surprenant et significatif est qu'il n'en a pas du tout été ainsi : « la pratique s'est poursuivie tandis que l'interprétation s'effondrait »[1]. La thèse de Galison sur ce point peut alors se présenter de la façon suivante : en fonction de leurs spécialités d'origine, tous les chercheurs intéressés par la méthode de Monte-Carlo pouvaient bien être en désaccord sur le sens de cette pratique, ils n'en demeuraient pas moins aptes à communiquer, échanger ensemble à son sujet, ainsi qu'intéressés au fait de l'améliorer sans cesse. Tous n'étaient pas également avertis de la fiabilité mathématique d'une telle approche. Tous ne savaient pas ce que recouvraient exactement la notion mathématique de nombre aléatoire. Mais tous ont participé à ce travail collectif qui a mené au déploiement considérable des méthodes de Monte-Carlo. Un accord sur le sens épistémologique d'une pratique n'est donc pas toujours déterminant pour son déploiement effectif. Nous dirions que le « faire » ensemble prime parfois sur le « penser » ensemble et le partage de la signification. C'est en quoi cette « arène partagée »[2] doit être conçue, selon Galison, comme un cas exemplaire de « zone de transactions ».

Cependant, pour notre auteur, les méthodes de Monte-Carlo restent bien une forme de *langage* puisqu'elles constituent une arène où peuvent se côtoyer des scientifiques de diverses disciplines et de diverses obédiences épistémologiques. C'est sur cette dimension du dialogue que Galison insiste : cette pratique collective doit donc être conçue comme une sorte de « dialecte » (« *pidgin* » selon le terme anglais) permettant à des sous-cultures scientifiques auparavant étanches, de communiquer entre elles et de collaborer partiellement. Et Galison de constater que, progressivement, dans les années 1960, ce dialecte est devenu un véritable créole, ou « langage hybride », tendant à dessiner les contours d'une nouvelle sous-culture scientifique autonome, c'est-à-dire dispensée « d'être l'annexe d'une autre discipline » et ne nécessitant pas de traduction dans une « langue mère »[3]. Remarquons donc ici que c'est à nouveau essentiellement en termes de langage que Peter Galison conçoit cette « zone de transactions » propre à l'essor de la simulation numérique.

Même si les résultats auxquels son enquête historique l'a mené sont de nature complexe et relativiste, à la fin de son article de 1996, l'auteur esquisse un panorama de l'évolution de la méthode scientifique. Il n'est pas loin de penser, comme Stanislaw Ulam lui-même, que les

[1] [Galison, P., 1996], p. 151 : "Practice proceeded while interpretation collapsed."
[2] [Galison, P., 1996], p. 150.
[3] Ces expressions sont toutes reprises de la page 153 du même article de 1996.

méthodes de Monte-Carlo sont révélatrices d'une évolution fondamentale dans l'application des mathématiques en science en ce qu'elles inversent le rôle traditionnellement dévolu aux probabilités : auparavant, on résolvait des problèmes de probabilités en recourant aux équations différentielles, désormais, on résout des équations différentielles grâce à des processus stochastiques. Peter Galison prolonge et affermit cette idée en la rattachant à une opposition plus générale entre le « mathématicisme européen » traditionnel et les « mathématiques pragmatiques, rendues empiriques (« *empiricized* »), et dans lesquelles l'échantillonnage a le mot final »[1]. Dans un passage suggestif, Galison rapproche alors cette simulation directe de la nature, rendue possible par des moyens techniques nouveaux, les ordinateurs, de la représentation telle qu'elle était conçue avant le 16ème siècle en Europe : comme « une relation de ressemblance entre le signe et le signifié »[2]. Cette confusion entre le signe et la chose peut susciter de nombreuses interrogations, car elle nous semble aller en effet à l'encontre de toute cette tradition iconoclaste, et volontiers mathématiste, de l'épistémologie, telle que nous l'exposerons dans l'annexe B.

Peter Galison, de son côté, ne poursuit pas cependant son analyse épistémologique en une analyse anthropologique plus générale. Il en reste au niveau des pratiques scientifiques seules et préfère rattacher ce conflit des interprétations au sujet de la simulation numérique à un phénomène déjà mis en lumière par l'historien des sciences Norwood Russel Hanson : dans l'histoire des sciences, il arrive fréquemment qu'une procédure de calcul innovante finisse par passer progressivement pour une représentation de la réalité, sans doute par commodité et sous l'effet de l'accoutumance[3]. Plusieurs procédures de calcul sont ainsi passées du statut d'outil à celui de représentation. Ce serait le cas pour la simulation numérique :

---

[1] [Galison, P., 1996], p. 154.

[2] Si l'on veut voir se préciser l'allusion à l'épistémè pré-renaissante telle qu'elle apparaît effectivement dans ces propos succincts (qui nous paraissent cependant très suggestifs) sur le rôle du signe dans la simulation numérique, rappelons que, dans *Les mots et les choses,* le philosophe Michel Foucault a exposé longuement et assez précisément une telle interprétation. Voir sur ce point, dans [Foucault, M., 1966, 1990], le chapitre II, en entier, intitulé « La prose du monde ». Voir plus particulièrement la page 49 : « Entre les marques [les « signatures » portées par la forme des choses créées par Dieu et qui nous entourent] et les mots, il n'y a pas la différence de l'observation à l'autorité acceptée, ou du vérifiable à la tradition. Il n'y a partout qu'un même jeu, celui du signe et du similaire, et c'est pourquoi la nature et le verbe peuvent s'entrecroiser à l'infini, formant pour qui sait lire comme un grand texte unique. » Voir également p. 50 : « Le langage [pour le 16ème siècle et avant] fait partie de la grande distribution des similitudes et des signatures. Par conséquent, il doit être étudié lui-même comme une chose de nature. Ses éléments ont, comme les animaux, les plantes ou les étoiles, leurs lois d'affinité et de convenance, leurs analogies obligées […] Le langage n'est pas ce qu'il est parce qu'il a un sens ; son contenu représentatif, qui aura tant d'importance pour les grammairiens du 17ème et du 18ème siècle qu'il servira de fil directeur à leurs analyses, n'a pas ici de rôle à jouer. *Les mots groupent des syllabes et les syllabes des lettres parce qu'il y a, déposées en celles-ci, des vertus qui les rapprochent et les disjoignent, exactement comme dans le monde les marques s'opposent ou s'attirent les unes les autres.* » C'est nous qui soulignons cette dernière phrase car elle explicite clairement, selon nous, ce que Galison veut dire lorsqu'il évoque la ressemblance entre signe et signifié dans la simulation. La fiabilité de la simulation reposerait sur une nouvelle vision unitaire du signe et du monde, de type pré-renaissant : au rebours de toute la sémiotique de la modernité, les signes vaudraient parfois à nouveau comme des choses et pourraient donner lieu à tout autant d'expérimentations effectives. Mais à la différence du 15ème siècle, la garantie de la ressemblance entre signe et signifié n'est plus, pour nos contemporains, assurée par un Dieu, par un créateur fiable, parce qu'unique et univoque, des mots et des choses. Dès lors, nous pouvons prolonger la réflexion de Galison en son aval : qu'est-ce qui, dans la simulation, remplace aujourd'hui une telle instance divine comme garantie de la correspondance – qui confine d'ailleurs à l'identification – entre choses et signes ? Toute réponse univoque paraîtrait désormais plus qu'incertaine. Le manque actuel d'un repère ontologique homogène ou d'une référence théologique commune nous paraît pouvoir expliquer en partie cette plurivalence épistémologique de la simulation numérique telle que Galison l'a mise en lumière, par-delà la communauté de la pratique. C'est sans doute ce qui différencie essentiellement cette pratique propre à notre « post-modernité » qu'est la simulation numérique, des pratiques de connaissances pré-renaissantes fondées sur la « signature » des choses. D'où peut s'expliquer aussi le fait que l'on trouve de nouveau aujourd'hui nombre de penseurs pour nous prévenir contre toute identification magique entre le réel et le virtuel. Serait-ce pour nous engager vers une nouvelle Renaissance puis vers une nouvelle Réforme iconoclaste (pour une étude approfondie de l'iconoclasme dans la Réforme, voir [Christin, O., 1991]) ? Nous ne saurions le dire même si la simulation informatique des plantes ajoute encore à la ressemblance entre signes et choses.

[3] Galison s'accorde tout à fait avec les propos antérieurs de Ian Hacking sur l'importance de cette mise en lumière opérée précédemment par Hanson dans *Patterns of Discovery* (1959). Voici les propos de Hacking : « Cependant, N. R.

« L'ordinateur a commencé comme 'outil" - un objet pour la manipulation de machines, d'objets et d'équations. Mais, bit après bit (byte après byte), les concepteurs d'ordinateurs ont déconstruit la notion d'outil elle-même tandis que l'ordinateur finissait par passer non plus pour un outil mais pour la nature elle-même […] Alors que l'équation aux dérivées partielles était apparue comme le mobilier de haut rang décorant le ciel de Platon, maintenant les méthodes de Monte-Carlo semblent re-présenter véritablement la structure profondément acausale du monde. »[1]

À la fin de son article de 1996, Galison revient sur la leçon épistémologique que l'on peut tirer d'une telle histoire : on peut considérer, selon lui, que le constructivisme social est une perspective correcte dans la mesure où l'on a vu que ce n'était pas des catégories transcendantes et purement théoriques qui conditionnaient cette histoire, que ce soit la catégorie de simplicité, mobilisée par la théorie de la vérité-cohérence, ou de conformité au monde, mobilisée par la théorie de la vérité-correspondance. Mais, d'un autre côté, ce que montre le concept de « zone transactionnelle » permet de dépasser tout relativisme qui pourrait découler un peu trop vite d'une telle perspective sociologique. Ce que Galison nous semble vouloir dire ici, c'est que si la science est atomisée du point de vue des conceptions du monde qu'elle semble être à même de proposer, elle ne l'est pas du point de vue des pratiques expérimentales et de simulation. De telles pratiques forment comme autant de passerelles, de lieux d'échanges. Il règne donc dans les sciences contemporaines une forme d'unité pragmatique qui se moque de la désunification théorique c'est-à-dire fondamentale. Peter Galison nous semble ici avoir pris implicitement pour cible la notion d'incommensurabilité des paradigmes telle qu'elle a été mise en œuvre par les post-kuhniens, c'est-à-dire par Paul Feyerabend et quelques sociologues des sciences américains. Il s'inscrit ainsi dans la perspective ouverte notamment par Ian Hacking au début des années 1980, selon laquelle si, d'un point de vue purement représentationnaliste ou théorique, l'historien, le philosophe ou le sociologue des sciences peut considérer qu'il y a incommensurabilité des paradigmes et peut légitimement s'inquiéter de l'unité de la science, d'un point de vue socio-pragmatique en revanche, une telle désunification n'apparaît plus et la question se présente alors comme un faux problème

---

Hanson a remarqué une caractéristique curieuse de la genèse des idées scientifiques. Une idée neuve est d'abord présentée comme un procédé de calcul plutôt que comme une représentation littérale du monde tel qu'il est. C'est seulement par la suite que la théorie et les entités qu'elle comprend sont abordées de manière de plus en plus réaliste […] Souvent les auteurs de la nouvelle théorie sont partagés quant au statut à accorder aux nouvelles entités. Ainsi James Clerk Maxwell, l'un des créateurs de la mécanique statistique, était, au début de son travail, bien en peine de dire si un gaz est vraiment composé de petites sphères bondissantes produisant des effets de température. Il considéra d'abord que cette définition n'était qu'un simple modèle qui, heureusement, permettait de comprendre de plus en plus de phénomènes macroscopiques. Puis, progressivement, il devint réaliste. Par la suite, on en vint à considérer la théorie cinétique comme un compte rendu satisfaisant des choses telles qu'elles sont. On constate ainsi qu'en science, il est assez courant que l'anti-réalisme à propos d'une théorie particulière, ou des entités qu'elle implique, laisse place au réalisme », [Hacking, I., 1983, 1989], p. 63. Il faudrait, selon nous, rapprocher cette constatation de celle effectuée depuis longtemps déjà par les historiens et les philosophes des mathématiques lorsqu'ils veulent échapper au choix entre le constructivisme ou le platonisme mathématique : les constructions mathématiques, pratiquées d'abord comme schèmes finissent par valoir comme thèmes, ces thèmes ouvrant alors la voie à une intuition nouvelle, à une « intuition prolongée » au sens de Georges Bouligand. Cette intuition nouvelle préparerait notre regard intuitif à la « découverte » de nouveaux théorèmes, et cela même si leurs objets sont d'abord nés d'une construction. Et c'est sur ces thèmes nouveaux que des schèmes nouveaux pourraient à leur tour solidement se construire. Cette lecture de l'histoire des mathématiques repose donc fondamentalement sur l'idée philosophique selon laquelle l'opposition entre le donné et le construit est toute relative. Les racines d'une telle option philosophique sont, elles-mêmes, à rechercher dans les travaux philosophiques de Husserl.

[1] [Galison, P., 1996], pp. 156-157 : "The computer began as a 'tool' – an object for the manipulation of machines, objects and equations. But bit by bit (byte by byte), computer designers deconstructed the notion of a tool itself as the computer came to stand not for a tool, but for nature itself […] Where the partial differential equation had appeared as the exalted furniture decorating Plato's heaven, now Monte Carlo methods appeared to re-present truly the deeply acausal structure of the world".

suscité fallacieusement par l'erreur de perspective propre à notre cadre intellectuel, trop souvent encore naïvement platonicien. Le relativisme extrême ne serait la conséquence logique que d'une approche socio-historique qui a d'abord été trop exclusivement, donc fautivement, sensible aux devenirs des théorisations et des modèles théoriques dans les sciences. C'est la raison pour laquelle il faudrait faire une place à l'histoire des expériences, des instruments et des expérimentateurs.

Dans son ouvrage majeur paru un an plus tard, en 1997, Peter Galison inscrit cet épisode de la naissance de la simulation numérique dans une histoire matérielle, beaucoup plus vaste, de la microphysique au 20ème siècle. L'objet de son enquête déborde donc largement nos propres préoccupations. Mais nous voudrions cependant indiquer brièvement et commenter la problématique générale de cet ouvrage de manière à saisir plus largement quel est l'horizon historique dans lequel Galison croit bon d'inscrire sa réflexion historique sur la simulation. Selon notre auteur, en effet, il y aurait d'abord eu deux traditions relativement opposées dans les premiers temps de la microphysique contemporaine. Il y aurait eu celle dont le but affiché « était de représenter les processus naturels dans leur intégralité et leur complexité »[1], cela en recourant à des émulsions photographiques ou à des chambres à bulles. C'est celle qu'il nomme « tradition de l'image » du fait qu'elle aurait cherché à produire des représentations mimétiques et homomorphes, c'est-à-dire conservant la forme des processus naturels. Et il y aurait eu une seconde tradition, dite « logique », dont le but aurait été de ne préserver dans ses représentations que les relations logiques entre les événements, et cela en recourant préférentiellement à divers types de compteurs électroniques. Or, Galison montre qu'avec l'avènement de l'ordinateur et de la simulation, numérique, ces deux traditions auraient fusionné au début des années 1980. Cette fusion serait plus spécifiquement intervenue avec l'apparition « d'images de synthèse produites par ordinateur et engendrées par l'électronique »[2]. En particulier, il faudrait comprendre que la simulation en tant qu'image de synthèse aurait rendu possible les derniers développements des méthodes de comptage mises en œuvre à partir d'expérimentations avec la TPC, c'est-à-dire avec la « chambre à projection temporelle » :

« Sans la simulation fondée sur l'ordinateur, les détecteurs tels que la TPC seraient sourds, aveugles et muets : ils ne pourraient pas acquérir de données, les traiter et produire des résultats. On pourrait exprimer cela en des termes plus forts : sans la simulation sur ordinateur, la culture matérielle de la microphysique de la fin du 20ème siècle n'est pas seulement handicapée, elle n'existe pas. »[3]

D'où l'importance qu'il y a pour Galison à interpréter l'émergence de la simulation numérique comme zone intermédiaire. La notion de « zone de transaction », qu'il applique à la simulation, lui est donc notamment venue d'une prise en compte de ce fait majeur de l'histoire de la microphysique contemporaine : la fusion entre les deux perspectives traditionnelles de l'image et de la logique.

Dans un chapitre détaillé de ce livre de 1997, Galison reprend l'enquête historico-épistémologique déjà partiellement publiée dans l'article de 1996. Mais il y restitue avec plus de

[1] [Galison, P., 1997], p. 19.
[2] [Galison, P., 1997], p. 21.
[3] [Galison, P., 1997], p. 689 : "Without the computer-based simulation, detectors like the TPC were deaf, blind and dumb : they could not acquire data, process the, or produce results. This could be put in still stronger terms : without the computer-based simulation, the material culture of late-twentieth-century microphysics is not merely inconvenienced – it does not exist."

détails le fonctionnement d'une simulation numérique, à la Monte-Carlo, d'un processus de diffusion et de réaction de neutrons tel qu'il s'effectue dans une explosion nucléaire. Galison montre pourquoi l'on a pu effectivement considérer ce calcul comme identique à la mise en œuvre d'une « bombe artificielle ». En effet, la formalisation qu'apporte avec elle la simulation numérique impose de suivre à la trace et individuellement chaque « neutron artificiel »[1]. Ce calcul peut donc passer pour une réplique de la réalité dans la mesure où il est la réplique de l'histoire des états et des positions des particules. Or cette réplication patiente et mimétique est nécessaire parce qu'on ne peut se livrer à des artifices calculatoires simplificateurs qui permettraient de compresser cette histoire en la limitant aux états de début et de fin du processus. C'est l'occasion pour Galison de rappeler que l'interprétation ne prime pas sur la pratique, au contraire. Il faut selon lui reconnaître une certaine autonomie au développement des pratiques expérimentales par rapport à la théorie. Il est cependant significatif que notre auteur ne choisisse pas tout à fait le même verbe qu'en 1996 pour conclure, avec la même idée, son paragraphe : « la pratique s'est poursuivie tandis que l'interprétation éclatait »[2], écrit-il en 1997. Dans la même phrase, le « c*ollapsed* » de l'article de 1996 est devenu « *splintered* » en 1997 : « éclatait » a remplacé « s'effondrait ». On peut s'expliquer cette correction si l'on se souvient du contexte de l'article de 1996 : il s'agissait de contribuer à un cycle de conférences sur la question de la désunification de la science. Or, l'enjeu pour Galison était de montrer, de façon assez conquérante au besoin, que la théorie, plus précisément, que l'interprétation théorique des pratiques pouvait passer au second plan dans l'histoire des sciences et qu'elle devait même être considérée, dans certains cas, comme moribonde. Alors que dans l'ouvrage de 1997, il s'agit plutôt d'asseoir en priorité la notion de « zone de transactions », en insistant sur l'*éclatement* du sens des pratiques en diverses interprétations mais sans aller jusqu'à dire qu'elles sont de nul effet sur l'évolution de ces mêmes pratiques.

Dans ce glissement de vocabulaire, sans doute voulu et très maîtrisé par son auteur, nous voudrions voir percer une des deux limites, sans doute mineures, de ce travail monumental. En effet, Peter Galison, après avoir expliqué combien l'équipe de Los Alamos était intellectuellement, c'est-à-dire épistémologiquement mieux disposée qu'une autre à développer la méthode de Monte-Carlo et surtout à l'interpréter consciemment et de façon militante comme une pratique en rupture avec les pratiques de calcul précédentes, utilise ensuite cette histoire, ses avatars et ce qu'il en est ressorti pour minimiser, voire parfois pour tenter d'annuler, spécifiquement dans l'article de 1996, le rôle des croyances ontologiques ou épistémologiques particulières dans le développement de nouvelles pratiques scientifiques sous prétexte que, par la suite, cette nouvelle pratique ne rencontre pas une épistémologie qui permet de tenir un discours univoque sur elle. Or, il nous semble que le discours du Galison-épistémologue récuse par là quelque peu ce que l'enquête du Galison-historien a mis au jour : la nécessaire prise en compte du contexte épistémologique en histoire des sciences lorsque l'on veut comprendre comment une pratique nouvelle s'est mise en place. Comment faire sortir le discours épistémologique de Galison de cette contradiction ? Est-ce possible à partir des seuls travaux, au demeurant considérables, de cet auteur ?

Nous pensons que cela est possible si l'on se livre à une rectification minime de perspective. Galison a certes montré abondamment qu'avec l'émergence de la simulation numérique, nous sommes clairement devant le cas d'une sous-détermination de l'option épistémologique par la

[1] [Galison, P., 1997], pp. 711-713.
[2] [Galison, P., 1997], p. 746 : "Practice proceeded while interpretation splintered." À comparer avec [Galison, P., 1996], p. 151.

pratique scientifique. Mais il nous faut remarquer que cette sous-détermination se produit à l'intérieur d'un horizon épistémologique déterminé : l'horizon épistémologique normé par avance selon le seul axe positivisme/antipositivisme tel qu'il a été dessiné par Galison lui-même au début de son enquête. Or, on pourrait tout aussi bien considérer que c'est cet horizon seul qui se révèle en effet inadéquat pour penser la simulation, mais pas le rôle même des options épistémologiques en général. Galison semblerait donc confondre un horizon épistémologique particulier, une *épistémè* pour dire les choses un peu trop brièvement, avec l'épistémologie en général, prise en tant que fonction intervenant nécessairement dans la construction des pratiques scientifiques, fonction que le Galison-historien lui-même nous a montrée comme essentielle dans le devenir des pratiques. Si tel horizon épistémologique paraît littéralement désorienté devant une nouvelle pratique, nous ne sommes pas nécessairement devant le cas d'une faillite du rôle de l'épistémologie *en général* dans l'histoire de la science. Il n'est donc pas nécessaire de disqualifier unilatéralement toute interprétation épistémologique formant un contexte favorable à la naissance d'une pratique sous prétexte que les interprétations doublant par la suite cette pratique sont souvent en effet de peu de poids dans son développement ultérieur.

À sa décharge, nous devons noter que Galison complexifie par ailleurs encore davantage son épistémologie de l'histoire des sciences puisque, à la fin de son ouvrage, il propose la notion suggestive d'« intercalation ». Selon la perspective qu'introduit cette dernière notion, il faudrait considérer que l'histoire des sciences est constituée de trois histoires qui se frottent les unes aux autres sans jamais marcher exactement du même pas : l'histoire des instruments, l'histoire des théories et l'histoire des expériences. Toutes les trois possèdent une autonomie relative que les historiens des sciences devraient davantage prendre au sérieux selon les préconisations de Galison. Par ailleurs, les « zones de transactions » opéreraient çà et là, et de proche en proche, à titre de passerelles entre ces sous-cultures différentes et relativement autonomes. Elles seraient comme autant de lieux de communication, comme autant de frontières langagières délimitant en même temps qu'articulant entre elles ces sous-cultures. En tant que lieu de langage par excellence, et donc de traduction, une zone de transaction donnerait naissance à des dialectes puis à de véritables créoles, les créoles n'ayant pas besoin de savoir désigner la totalité des objets culturels exprimés par les langues qu'ils bordent mais seulement ceux qui circulent aux frontières avec les autres sous-cultures et qui servent à leur interaction.

Nous voyons donc bien que, selon Galison, la simulation numérique serait essentiellement à rapporter à un *espace linguistique* dont la grammaire serait fondée dans les règles mêmes de la mise en pratique de la simulation. Elle serait un lieu de circulation de concepts et de pratiques servant à relier spécifiquement les langages différents des expérimentateurs et des théoriciens. Or, malgré et même sans doute grâce au caractère pénétrant de ces analyses, c'est sur ce second point qu'il nous semble possible de formuler une critique à l'encontre de cette épistémologie différenciée, car intercalante, de l'histoire des sciences. Aujourd'hui encore, faut-il cantonner la simulation dans le rôle d'un espace linguistique interstitiel ? Galison lui-même semble s'orienter parfois vers l'idée que la simulation a fini en fait par créer une véritable sous-culture, elle aussi relativement autonome. Mais, dans d'autres passages, il s'en tient au contraire à l'idée selon laquelle elle en resterait au stade d'une culture créole, à l'interface entre des cultures dominantes. Si ce constat peut valoir jusque dans les années 1970, est-ce encore le cas pour les dernières décennies ? N'y a-t-il pas lieu de repérer là encore une attitude trop exclusivement linguisticiste

dans cette épistémologie de l'histoire des sciences contemporaines[1] ? En effet, si nous faisons droit à notre remarque précédente selon laquelle Galison a en fait montré qu'on ne peut faire l'économie d'une histoire de l'épistémologie des scientifiques lorsque l'on se livre à une histoire des sciences, quand bien même il s'agit de l'histoire de la simulation, n'est-il pas en conséquence réducteur de ne traiter la pratique de la simulation que comme celle d'un langage déraciné et hybride sans réel besoin de fondement épistémologique, même fictif ou mythique ? Toute pratique scientifique est-elle réductible à une circulation de signes au point qu'elle puisse se passer de mythe sur le sens, l'origine et la légitimité de ses mots ? Nous ne le croyons pas. Si l'on veut se fonder sur l'anthropologie des créoles pour s'expliquer certaines pratiques scientifiques, comme le fait Galison à la fin de son livre de 1997[2], il ne nous paraît justement pas possible de nier l'épaisseur culturelle autonome qui se constitue bien vite en même temps que le langage hybride. Et même si l'on veut continuer à nier la profondeur culturelle des peuples à expression créole, on ne peut nier que ces cultures ou sous cultures sont avides de mythification et d'enracinements même artificiels, même empruntés, ainsi que le montre la littérature d'auteurs contemporains comme Patrick Chamoiseau, par exemple.

Par conséquent, pour être plus fidèle à la magistrale leçon d'histoire que donne l'enquête minutieuse de Galison, il nous semble qu'il faudrait intercaler une quatrième histoire et donc une quatrième sous-culture démarquant sans cesse l'histoire des sciences sans jamais être totalement congédiée par elle : celles des croyances ou des horizons épistémologiques, ou *épistémè,* des scientifiques ou, plus généralement, celles des croyances épistémologiques propres à l'esprit du temps considéré. Ainsi, il serait tout à fait compréhensible que, parfois, voire le plus souvent, une pratique scientifique devance en quelque sorte l'épistémologie qui pourrait la penser de façon satisfaisante et univoque (cela n'a-t-il pas été le cas pour la mathématisation de la mécanique classique jusqu'à ce que Kant propose une sorte de « solution épistémologique », avec l'idée d'une construction des concepts dans l'intuition ?), de même qu'une épistémologie pourrait se retrouver « en avance » par rapport aux théories, aux instruments ou aux pratiques, et faire ainsi figure d'idéologie, au sens de Canguilhem[3]. Avec l'actuel développement des réflexions épistémologiques sur la simulation informatique, nous n'aurions donc pas nécessairement affaire à un combat d'arrière-garde, mais plutôt à la manifestation, dans une phase encore actuellement embryonnaire, d'un besoin d'explicitation et de légitimation épistémologiques d'une pratique particulièrement désorientante. Il ne faudrait peut-être pas tirer tout de suite et prématurément du constat, par ailleurs indéniable, d'une désorientation actuelle de l'épistémologie à l'existence avérée et définitive d'une épistémologie de la désorientation.

---

[1] Cela, malgré la dénégation pourtant assez explicite de Galison : "By invoking pidgins and creoles, I do not mean to 'reduce' the handling of machine to discourse. My intention is to *expand* the notion of contact language to include *structured symbolic systems* that would normally be included within the domain of 'natural' language" ; notre traduction : « En invoquant les pidgins et les créoles, je ne veux pas dire qu'il faille 'réduire' la manipulation de machines aux discours. Mon intention est d'*étendre* la notion de langage de contact de façon à inclure des *systèmes symboliques structurés* qui seraient normalement inclus dans le domaine du langage 'naturel' », *ibid.*, p. 835. C'est l'auteur qui souligne. Cependant, dans la suite, Galison n'échappe pas véritablement à cette réduction de la pratique concrète à une pratique de discours, puisqu'il croit pouvoir saisir, par ce recours à la métaphore linguistique, ce qu'il croit être l'essentiel du rôle qui est dévolu aux zones de transactions.

[2] Dans les pages 835 à 838.

[3] Voir [Canguilhem, G., 1977, 2000], pp. 33-45. Ainsi est-ce partiellement le cas du projet d'axiomatisation de la biologie chez Woodger (1937).

Gerald Holton

En ce qui concerne le dernier point, on pourrait nous objecter que le concept de thème de l'imagination scientifique ou « thêma », déjà introduit par l'historien des sciences américain Gerald Holton dans les années 1970[1], recouvre ce que nous voudrions voir également à l'œuvre au titre d'options épistémologiques voire ontologiques dans la pratique scientifique. En ce cas, il convient de s'enquérir d'abord brièvement du sens précis que Holton donne à ce concept, de façon à être mieux à même de juger de la pertinence de son usage dans le cas de l'histoire des formalismes.

Par le terme de « thêma », Gerald Holton entend en effet désigner toute conception première, relativement indéracinable et auquel adhère fortement et de façon assez irrationnelle un scientifique particulier, dans sa pratique « privée » de la science. Ces « thêmata » ou conceptions premières peuvent se présenter sous trois modes différents[2] : premièrement, sur le mode d'un concept préférentiel indéracinable ou « concept thématique », par exemple, les concepts de symétrie ou de continu ; deuxièmement sur le mode d'un « thêma méthodologique », par exemple l'expression préférentielle des lois « en termes d'invariances, d'extremums ou d'impossibilités »[3] ; troisièmement sur le mode d'une « proposition thématique ou hypothèse thématique », « telles que l'hypothèse de Newton, quant à l'immobilité du centre de l'univers, ou les deux principes de la théorie de la relativité restreinte »[4]. Gerald Holton donne alors d'autres exemples de thêmata en précisant qu'ils se présentent souvent sous forme de couples antithétiques : « évolution et involution, invariance et variation, hiérarchie et unité, l'efficacité des mathématiques (de la géométrie, par exemple) opposée à l'efficacité des modèles mécanistes en tant qu'instruments d'interprétation »[5].

Or, il est important de bien comprendre la signification du choix du mot « thème » dans ce cadre-là. En effet, ces « thèmes » appartenant à l'imagination scientifique commune, mais particularisés préférentiellement dans l'esprit de chaque scientifique, ne sont pas encore tout à fait des thèses : ils n'affirment pas directement ni frontalement une existence ou une inexistence ou bien encore une nécessité concernant un être ou un type d'êtres. Ils ne posent pas ni ne décident *a priori* ; ils sont des « idées directrices »[6] au sens donné à cette expression dans les études littéraires : ils correspondent à des termes dans lesquels on préfère exprimer ce que l'on veut dire, donc à une stylisation particulière de l'espace de l'imagination. Ainsi, celui qui est davantage porté vers tels thèmes acceptera de les perdre de vue un moment ; mais c'est pour se promettre de les rejoindre dès que possible. Ils ne sont donc pas omniprésents, conditionnants ou infrastructurels, ils sont simplement récurrents. Ce qui caractérise un thème, c'est donc avant tout sa récurrence, c'est le fait qu'il polarise l'imagination, c'est-à-dire l'espace de l'invention intellectuelle, non le fait qu'il conditionne logiquement, effectivement et en dernière analyse les formulations du savoir. Les « thêmata » sont donc plutôt des tics de pensée, des tropismes de l'imagination créatrice, des récurrences intellectuelles ou bien encore des « plis » de l'intelligence scientifique qui se prennent,

[1] Voir [Holton, 1973, 1978, 1981], pp. 7-47.
[2] [Holton, 1973, 1978, 1981], p. 28.
[3] [Holton, 1973, 1978, 1981], p. 28.
[4] [Holton, 1973, 1978, 1981], p. 28.
[5] [Holton, 1973, 1978, 1981], p. 30.
[6] Dans les ouvrages introduisant aux études littéraires auxquelles Holton se réfère explicitement, la notion de « thème » (qui donne lieu à des « analyses thématiques » d'œuvres, c'est-à-dire encore à ce qu'on appelle des « commentaires composés ») est en effet souvent présentée comme synonyme de l'expression « idée directrice ». Il ne faudrait bien sûr pas confondre cette expression, dont le sens est plus souple et plurivoque, avec celle d'« idée régulatrice » qui désigne chez Kant une idée, ou idéal, de la raison pure, ne possédant donc aucun contenu mais se présentant comme la promesse univoque, aux délais toujours repoussés, d'un tel remplissement. Sa fonction est d'orienter et réguler continûment le fonctionnement de la connaissance d'entendement.

se communiquent assez peu, mais se conservent assez durablement chez une même personne. C'est la raison pour laquelle Gerald Holton tient à les distinguer fortement des « archétypes jungiens » (ils ne sont pas universels et totalement anhistoriques), mais aussi de la métaphysique, des « paradigmes et des visions du monde »[1]. En particulier, en reprenant la terminologie de Thomas Kuhn, Holton affirme que ce qui distingue les « thêmata » des paradigmes tient au fait que « les thêmata subsistent d'un bout à l'autre des époques de révolution »[2] au contraire des paradigmes. Il ajoute : « à un degré bien plus poussé que ce n'est le cas des paradigmes ou des visions du monde, les options thématiques semblent provenir non seulement du milieu social, ou de la 'communauté' du scientifique, mais bien plus encore de l'individu »[3]. L'existence des thêmata témoignerait donc d'une certaine autonomie, si ce n'est d'une certaine prévalence, de la vie psychique du sujet individuel producteur de science par rapport aux influences extérieures. Nous rejoindrions donc ici ce que nous voulions voir précédemment apparaître sous la forme d'une quatrième histoire à l'intérieur de l'histoire des sciences dite intégrative : une histoire des croyances et des horizons épistémologiques des scientifiques comme, plus largement, de leurs contemporains. Or, c'est bien là que l'on peut comprendre ce que commande nécessairement une telle lecture de l'histoire des sciences : un certain retour au psychologisme, c'est-à-dire à la prise en compte intégrative du vécu individuel du sens dans la pratique scientifique. C'est ce psychologisme subjectiviste qui a été depuis déjà très longtemps congédié dans l'épistémologie historique française contemporaine : d'abord par Bachelard, puis par Cavaillès (s'autorisant sur ce point de Husserl), par les néo-marxistes (comme Althusser et Lecourt), par les structuralistes puis, dernièrement, par l'approche pragmatique de l'histoire des sciences et enfin par le programme fort de la sociologie des sciences. Avec sa notion d'« activité scientifique privée »[4], Gerald Holton essaie, au contraire, d'imposer l'idée qu'il est toujours pertinent de s'interroger également sur les vécus particuliers, les « psychobiographies » des producteurs et des acteurs de la science.

Or, l'hypothèse sous-jacente à ce type d'approche est, comme l'a bien compris le traducteur principal de Holton, Jean-François Robert[5], l'affirmation d'une certaine unité et d'une certaine cohérence propre à chaque esprit humain par-delà ses manifestations sociales. Pour exposer l'hypothèse philosophique qui est la sienne, dans cette approche particulière et unifiée de l'esprit du scientifique, Holton lui-même ne peut mieux faire que de citer l'extrait d'un texte de l'historien des philosophies religieuses, Harry A. Wolfson :

« Les mots, en général, du fait même qu'ils sont de par nature limités, cèlent la pensée autant qu'ils la décèlent ; et les paroles expresses des philosophes, si excellentes et prégnantes qu'elles soient, ne sont guère qu'autant de flotteurs, balisant le site inféré du non-dit et des pensées englouties. L'objet de la recherche historique en philosophie est donc de mettre au jour ces pensées, ce non-dit ; de restituer les procès latents de raisonnement qui sous-tendent toujours les paroles expresses du discours ; et de déterminer le sens véridique de ce discours, en retrouvant son histoire – comment il advint que cela fut dit, et pourquoi l'avoir dit de telle manière. »[6]

---

[1] [Holton, 1973, 1978, 1981], p. 46.
[2] [Holton, 1973, 1978, 1981], p. 46.
[3] [Holton, 1973, 1978, 1981], p. 46.
[4] Voir la définition de Holton : « Ce que nous appelons 'activité scientifique privée' dans ce contexte renvoie essentiellement aux aspects de 'l'instant de genèse' de la découverte, dont il est d'ordinaire convenu qu'il ne sera pas fait état dans la 'science publique' qu'enregistrent revues scientifiques et monographies », [Holton, 1973, 1978, 1981], p. 23, note 2.
[5] Voir [Holton, 1973, 1978, 1981], p. 18.
[6] Harry A. Wolfson, *in Philosophical Foundations of Religious Philosophy in Judaism, Christianity and Islam*, Harvard University Press, Cambridge (Mass.), 1947, vol. I, p. 107 ; cité par [Holton, G., 1973, 1978, 1981], p. 11.

À la lecture de ce texte, on comprend que les recherches de Holton soient principalement axées sur la découverte de ce qu'il appelle les « raisons profondes » qui ont pu animé Copernic, Kepler, Einstein ou d'autres grands acteurs de la science. Or, c'est bien le recours à cette « profondeur » du sujet qui est récusé dans la philosophie des sciences française d'après-guerre. Elle partage en cela, qu'elle le veuille ou non[1], l'esprit « anti-interrioriste » d'un Jean-Paul Sartre et de son existentialisme, bien que, certes, pas toujours pour les mêmes raisons que lui. Rappelons tout de même que, dans des termes fort influents, ce dernier avait condamné l'idée que le « sujet » créateur puisse contenir plus que ce qu'il fait : « Il n'y a pas de génie autre que celui qui s'exprime dans des œuvres d'art : le génie de Proust, c'est la totalité des œuvres de Proust ; le génie de Racine, c'est la série de ses tragédies, en, dehors de cela, il n'y a rien. »[2]

Nous devons donc prendre conscience que si, dans le cadre d'une histoire des sciences contemporaines, on veut avoir recours malgré tout aux « options épistémologiques » ou aux « thêmata » des acteurs de la science, on s'inscrit dans une démarche aujourd'hui assez minoritaire[3], allant à l'encontre de l'« esprit du temps » dont on veut pouvoir rendre compte cependant, et qui vise à réinvestir le sujet et ses ressorts cachés. Or, cela est-il utile, voire simplement possible ou souhaitable, si l'on aborde l'histoire particulière de la modélisation mathématique ? C'est une question que nous nous sommes immanquablement posée. Le champ de la modélisation doit selon nous se prêter plus qu'un autre à une analyse thématique voire stylistique du type de celle que prône Holton. Cependant, comme notre enquête ne définit pas son cadre d'étude par des « événements » singuliers, des inventions ou des découvertes particulières, comme le fait en revanche Holton, mais plutôt par le champ d'une pratique et de ses évolutions différenciées, une approche micro-psychologique et monobiographique à la façon de Holton, donc très axée sur les « idiosyncrasies » des individus, nous serait d'une faible utilité. Pour notre part, nous essayons alors de voir si, en revanche, l'idée d'une adhésion collective, relativement durable, de certains micro-groupes sociaux à certaines options épistémologiques, voire ontologiques, donc à une certaine stylistique modélisante (au delà donc du « thématique » qui, dans la perspective de Holton, intervient seulement dans le travail individuel) peut être également confirmée et développée. Dans cet ordre d'idée, il ne saurait être question d'utiliser de façon inchangée les notions kuhniennes de « paradigme » ou de « matrice conceptuelle » puisque, dans le cas particulier de l'histoire de la modélisation, on ne pourrait logiquement corréler ces notions à aucune idée précise de « science normale », et cela même s'il existe des styles dominants, à un moment donné de l'histoire de la modélisation. C'est en revanche ce genre de domination, mais aussi et surtout les coexistences pacifiques « normales »[4] entre les différentes stylisations et les évolutions qui s'ensuivent que l'historien devrait être justement à même d'expliquer, sans user pour ce faire du terme de « révolution » mais peut-être seulement de celui de « réforme » puisque seules quelques règles du jeu scientifique sont alors modifiées, non le jeu lui-même dans son ensemble. Nous formulerions en revanche l'hypothèse que ces réformes à l'intérieur des

[1] Bachelard a fortement critiqué l'« existentialisme » dans *Le rationalisme appliqué*, par exemple.
[2] [Sartre, J.-P., 1946, 1996], p. 52.
[3] Bien que les célèbres travaux, déjà assez anciens, de Shapin et Schaffer, sur Hobbes, Boyle et la pompe à air, aient inauguré une forme d'histoire à la fois sociologique et compréhensive des techniques et des sciences, et où la philosophie occupe donc une place de choix. Voir [Shapin, S. et Schaffer, S., 1985]. Notre propre travail ne prétendant pas rivaliser avec la finesse et la richesse de l'analyse de ces auteurs, il nous paraît en revanche hautement souhaitable que certains travaux d'histoire des sciences *contemporaines* tendent à adopter cette même perspective, même si cela constitue un véritable défi à l'actuelle compartimentation (réelle ou supposée) des savoirs.
[4] L'existence de telles « coexistences pacifiques normales » entre divers styles de modélisation marquerait bien la non pertinence du concept de « science normale » dès lors que l'on veut étudier l'évolution des pratiques de modélisation.

préférences stylistiques ne pourraient être souvent accomplies que par d'autres individus que ceux qui soutenaient l'état précédent des rapports entre les différents styles de modélisation. Notre étude nous a montré que les acteurs conservent en général une forte inertie dans leurs options ontologiques, cela même si leurs options épistémologiques semblent parfois, mais rarement, se subtiliser et varier (comme chez Rashevsky par exemple). Ceci montre que les options épistémologiques restent dominées et régies par les options ontologiques plus que l'inverse n'est vrai.

Moyennant une légère rectification nous permettant de passer à l'échelle des groupes ou des écoles de modélisation, nous allons donc dans le sens de l'argument de Holton précédemment cité : les « options ontologiques » intervenant dans les préférences stylistiques en modélisation mathématique, à l'instar des « thêmata » et à la différence des paradigmes, seraient relativement indéracinables chez les individus concernés, quel que soit le changement de fortune relative des différentes stylistiques de modélisation au cours de l'histoire de la science et de ses réformes. Cela nous autorise donc à adopter par moments une approche psychologique ou subjectiviste (lorsqu'il s'agit de s'expliquer, par exemple, ce qui a formé la conviction et les préférences de quelques acteurs de poids, spécialement et en dernier recours, lorsque l'on se sent mis en demeure d'expliquer ou de comprendre une préférence stylistique qui nous paraîtrait autrement purement contingente ou accidentelle) et, à d'autres moments, une approche davantage sociologique, notamment lorsqu'il s'agit de rendre compte des influences sociales et de tout autre facteur extérieur ayant favorisé le déploiement d'un nouveau style de modélisation. Un nouveau style de modélisation ou un nouveau rapport hiérarchique, ou de mutuel conditionnement, entre divers styles de modélisation renverrait donc, notamment, mais pas seulement bien sûr, à l'apparition d'une expression techniquement, socialement et conceptuellement nouvelle d'une option épistémologique ou ontologique cependant ancienne et récurrente sous sa forme stylistique.

Tels seraient donc selon nous, et à première vue, les quelques légers amendements qu'il faut apporter à l'approche de Galison afin de rendre compte au mieux, comme tel a été notre objectif ici, d'une histoire des transferts de concepts formels et de pratiques de modélisation mathématique entre quelques sciences, et notamment entre physique et sciences de la vie, au cours du 20ème siècle. Ainsi, nous avons proposé d'introduire la notion d'*horizon d'homogénéisation* pour prendre en compte le fait que les histoires intercalées font certes paraître des zones de transaction, mais que ces transactions font toujours elles-mêmes fond sur un accord ontologique minimal. Cet accord ontologique renvoie souvent à un *thème* majeur d'une école de modélisation ou d'une école de pensée épistémologique. Notre étude de l'épistémologie de la dispersion formelle nous a par exemple montré combien cette épistémologie, qui pourrait se présenter pourtant comme la plus neutre et la plus objective, parce que la moins intrusive et la moins prévenue, s'enracine encore dans des convictions ontologiques qui s'autorisent du caractère complexe et irreprésentable de la nature.

ANNEXE B

Quelques jalons pour une Histoire de la philosophie des modèles au 20ème siècle

Dans les paragraphes qui suivront, nous procèderons à un exposé analytique et généalogique cursif des différentes positions existantes concernant le statut des modèles. Notre analyse se focalisera sur le contexte français[1]. Nous tenons en effet à privilégier ces sources du fait qu'une grande partie de notre histoire concerne plus spécifiquement des travaux scientifiques produits dans ce même contexte et qui se trouvent avoir interagi avec les philosophies des modèles françaises. De plus, l'histoire de la philosophie des modèles au 20ème siècle dans le contexte du positivisme logique anglo-saxon a déjà été rapportée et brillamment synthétisée par Margaret Morrison et Mary S. Morgan dans leur introduction à *Models as Mediators*[2]. Rappelons qu'elles proposent de voir trois périodes dans cette philosophie des modèles : une période syntaxique où le modèle est pensé comme un construit formel purement isomorphe syntaxiquement à la réalité qu'il décrit et ayant la nature de substitut d'une théorie (le premier Carnap, le premier Wittgenstein) ; une période sémantique où le modèle, en conformité avec la théorie des modèles notamment développée par Tarski (à partir de 1936) et reprise par Suppes (1961), est pensé comme l'interprétant plus concret d'un système formel abstrait (voir aussi le second Carnap) ; une période pragmatique dans laquelle, après les travaux d'Austin notamment (1962), le modèle est perçu comme un médiateur entre des discours en fonctionnement et en interférence, et est non réductible à l'un quelconque de ces discours, d'où la certaine action pragmatique du modèle (retour au second Wittgenstein). Les auteurs de cette périodisation reconnaissent d'elles-mêmes appartenir à cette troisième phase, d'où le titre de leur ouvrage collectif. Nous nous permettrons ici de constater que, rétrospectivement et très schématiquement, la philosophie des modèles du positivisme logique n'a donc fait que suivre les différentes dimensions, reconnues depuis Humboldt[3], du phénomène linguistique. D'où notre question liminaire : qu'en a-t-il été de la philosophie des modèles française ? A-t-elle su échapper à cette réduction anthropomorphe du modèle scientifique au langage humain ?

Une fois que nous disposerons d'une vision assez large sur les états passés et sur l'état présent de la question des modèles en France, nous serons à même de répondre à cette question de savoir si un accord épistémologique minimal a vu le jour avec la perspective du positivisme logique, et, si tel est bien le cas, de quelle nature exacte cet accord peut être. Pour des raisons de commodité, par l'expression « question des modèles », nous choisissons de désigner la question de leur statut épistémologique, qu'on interprète ce statut comme l'équivalent de celui d'une théorie,

[1] Pour une étude détaillée de l'émergence de la philosophie des sciences conventionnaliste en France au tournant du 19ème et du 20ème siècle, nous renvoyons aux études d'Anastasios Brenner, en particulier [Brenner, A., 2003]. Pour notre part, nous concentrerons ici notre analyse sur le rôle qui est conféré aux modèles dans des philosophies plus contemporaines et touchant des sciences plus récentes.
[2] [Morgan, M. S. et Morrison, M., 1999], pp. 1-9.
[3] Voir [Habermas, J., 1999b, 2001], pp. 13-23.

d'une représentation, d'une figuration, d'une interprétation de théorie, d'une illustration, d'une fiction heuristique, d'une expérience de pensée, d'un outil théorique (pour le calcul), d'un outil expérimental (pour le traitement des données), d'une sorte d'expérience ou d'une expérience authentique[1]. Il nous sera ainsi possible, croyons-nous, de mettre au jour une caractéristique partagée par nombre d'épistémologies contemporaines, ce qui pourrait bien nous autoriser à parler d'un « esprit du temps », spécifiquement relayé dans le domaine de la philosophie des sciences de la seconde moitié du 20ème siècle. C'est à cet esprit du temps que les nouvelles simulations s'affrontent aujourd'hui.

Il nous serait évidemment impossible et peu utile de résumer ici l'ensemble des doctrines propres aux philosophies des sciences contemporaines françaises. De surcroît, dans *L'Âge de l'épistémologie*, la philosophe Anne-Françoise Schmid a déjà mis en perspective l'histoire récente de l'épistémologie, notamment dans ses rapports avec le développement des modèles en science. Partant d'une reconnaissance de la diversité des fonctions dévolues aux modèles, ce travail montre bien qu'avec l'émergence et la généralisation de cette pratique, dues, selon son auteur, au développement conjoint de la technologie et des sciences du « génie » ou de l'ingénieur, l'épistémologie quitte une période au cours de laquelle elle polarisait trop exclusivement son attention sur le couple théorie/expérience et sur la problématique corrélative de la vérification/falsification. Le modèle, après avoir été considéré comme un « outil d'interprétation de la théorie »[2], puis comme une « élaboration abstraite du réel »[3] devrait davantage être conçu comme un instrument d'intégration de connaissances hétérogènes[4]. Prenant alors conscience de cette nouvelle donne, l'épistémologie pourrait devenir « quelque chose comme une science des jonctions »[5]. Cette lecture générale nous paraît tout à fait pertinente. Et il nous semble que l'on peut même la prolonger et la préciser sur un point, si l'on observe que la longue réticence à l'égard des modèles, elle-même étroitement liée à l'accusation réitérée d'idéalisme dans la philosophie française, n'est pas seulement due au fait qu'une telle accusation permet de neutraliser un peu verbalement les positions d'un adversaire philosophe[6]. Car on peut montrer que l'accusation d'idéalisme n'est pas sans lien avec un certain refus des images et des simulations, en général. Mais avant d'aller plus loin sur ce sujet, et afin de faire une lecture plus spécifique encore de la philosophie des sciences française, indiquons que deux questions directrices constantes nous serviront ici à sélectionner plus particulièrement les points qui nous intéressent, dans ces épistémologies qui se sont particulièrement penchées sur la question des modèles. Il s'agira tout d'abord de la question du statut argumentatif et épistémique des modèles : comment notre auteur l'évalue-t-il ? Et pour quelles raisons ? Dans cet horizon-là, nous aurons affaire à un certain nombre de caractérisations divergentes, conformément à la liste que nous venons de préciser. Il s'agira ensuite de conserver en mémoire une autre question : celle du statut de la simulation par ordinateur. Cette question est différente de la première dans la mesure où l'apparition de la

[1] Cette liste, assez exhaustive à notre connaissance, représente donc pratiquement un continuum sur lequel le statut des modèles a été diversement projeté.
[2] [Schmid, A. F., 1998], p. 122.
[3] [Schmid, A. F., 1998], p. 131.
[4] Mais l'auteur ne va pas jusqu'à distinguer les simulations numériques, les simulations informatiques, les modèles monoformalisés et les modèles pluriformalisés. Ce qui nous paraît essentiel.
[5] [Schmid, A. F., 1998], p. 145.
[6] « L'épistémologie est ainsi faite qu'elle ménage en elle les positions les plus contraires, et que la lutte contre l'idéologie pourrait parfois bien risquer d'être simplement une lutte contre des positions simplement 'adverses' », [Schmid, A. F., 1998], p. 132. Dans la suite, nous tâcherons de montrer que ce terme d'idéologie (récurrent dans les années 1960 surtout) est peut-être plus significatif encore, et qu'il peut passer pour une sorte de double, en forme de *lapsus*, du terme d'idolâtrie.

simulation par ordinateur semble dépendre non seulement de la première question (celle du statut du modèle) mais également d'une autre question, plus ancienne et plus générale en philosophie des sciences, celle de la nature et du rôle des représentations scientifiques. En effet, si le modèle a semblé, pendant un temps, pouvoir échapper aux accusations de se prêter à l'idolâtrie (parce que devenant plus formel et mathématique), la simulation, avec sa nette tendance à ne reproduire que les apparences ou la surface des choses, peut-elle toujours se dérober à cette critique ? La simulation n'est-elle pas en effet une nouvelle idole, autrement dit une représentation trompeuse, donc par nature anti-scientifique ? Cette question est devenue progressivement plus prégnante dans la philosophie des sciences, au milieu des années 1980, mais malheureusement davantage portée par l'effet spectaculaire du progrès des images de synthèse et des mondes virtuels que par une réelle connaissance et prise en compte de l'évolution des méthodes de la science, comme nous le verrons.

Quoi qu'il en soit, l'ancienne critique de toute interprétation des modèles comme figurations du réel n'est-elle pas alors de nos jours simplement déplacée et reconduite sous la forme d'une critique de la simulation comme duplication mensongère ? Si l'auteur que l'on analyse considère la simulation comme une forme de modèle ou comme la continuation d'un modèle, sans plus, cette deuxième question de l'idolâtrie ne se posera pas pour lui. Mais notre auteur peut au contraire voir dans la simulation une forme nouvelle de représentation scientifique. Dans ce dernier cas, interprète-t-il cette forme de représentation comme un redoublement du réel (ce qui permettrait de s'expliquer la conception de véritables « expériences virtuelles » selon une expression que l'on retrouve de plus en plus dans les articles scientifiques) ou simplement encore comme une figuration créative transfigurant l'expérience immédiate (une figuration médiatisante ou « dépaysante » comme le suggère Gilles-Gaston Granger[1]) servant à mieux asseoir la construction théorique ? Avec de telles questions, nous aurons l'occasion de mettre en lumière la teneur de la plupart des discours critiques que les philosophes ont tenu à ce sujet, ainsi que certains des rapports que ces discours entretiennent les uns avec les autres.

L'iconoclasme : une tradition philosophique bien ancrée en France

Si l'on se penche sur l'apport de l'épistémologie française à la question du statut des modèles, on découvre, selon nous, une remarquable[2] constance dans un ensemble d'arguments qui peuvent, par ailleurs, paraître hétéroclites ou de simple circonstance. Que l'on revienne en effet sur la critique des modèles mécaniques (Duhem, P., 1914) ou des images figées en science (Bachelard, G., 1951) ou des modèles cybernétiques (Canguilhem, G., 1963) ou du positivisme en général (Althusser, L., 1967) (Badiou, A., 1969) ou de la représentation répliquante (Dagognet, F., 1973) ou du modèle comme simple figuration (Bachelard, S., 1979), on assiste invariablement à une dévalorisation constante de l'image reproductrice, dans le processus de la connaissance scientifique. La mise au jour de cette constante préférence implicite est récente. L'accord implicite entre ces épistémologies n'apparaît de façon éclatante qu'à travers leur relatif et commun échec dans leurs tentatives de penser la simulation informatique, nouvelle venue sur la scène scientifique. Leur inspiration philosophique commune (un certain iconoclasme, c'est-à-dire un refus de l'image reproductrice), déjà aperçue et partiellement critiquée par François Dagognet

[1] [Granger, G.-G., 1960, 1967], p. 90. Dans ce passage, pour Gilles-Gaston Granger, la machine à traduire « coupe l'objet linguistique des significations vécues ». Il s'explique : « En le dépaysant radicalement, pour ainsi dire, il confère à son caractère structural l'autonomie qu'exige une véritable objectivation », [Granger, G.-G., 1960, 1967], p. 91.
[2] Et, à notre connaissance, inaperçue jusqu'à présent.

(partiellement parce que nous verrons en effet que ses travaux conservent quelques traces d'iconoclasme), n'a donc pu paraître en pleine lumière et dans sa radicalité qu'en même temps que sa caducité, notamment au vu des pratiques de la science récente.

Avant d'en dire davantage, rappelons donc quels furent les arguments de ces auteurs et montrons que l'iconoclasme, ancré dans une longue tradition philosophique[1], y joua un rôle permanent quoiqu'à chaque fois d'une façon plus indirecte et plus subtile. C'est en retraçant ici les avatars contemporains de l'iconoclasme dans la philosophie des sciences française que nous apercevrons comment il a pu se subtiliser de manière à rester un obstacle pour la pensée de la simulation informatique, dès lors qu'elle sert comme instrument scientifique à part entière et pas seulement comme langage. Il nous sera alors possible de montrer que c'est plutôt sous la forme de déplacements conceptuels que ces avatars peuvent être à chaque fois expliqués et non pas nécessairement au titre de dépassements conceptuels[2]. Cela tendra à accréditer notre hypothèse selon laquelle un « esprit du temps » relativement stable tend à s'exprimer constamment et cela à travers les diverses épistémologies de notre temps. Nous empruntons assez librement ici à Jean-François Lyotard cette notion philosophique de « déplacement conceptuel » non pas au titre de thème philosophique mais au titre d'outil méthodologique pour servir à l'histoire des philosophies des sciences prises sous l'angle de leur traitement respectif des modèles. Au regard des filiations et des ruptures supposées entre les épistémologies contemporaines, nous aurons l'occasion à maintes reprises de voir s'opérer ce type de déplacement. Rappelons que Lyotard oppose le déplacement au dépassement, cette dernière notion étant d'inspiration hégélienne, comme il oppose la dérive à la critique, l'événement à la négativité[3]. On nous objectera peut-être que c'est là partir du principe injustifié qu'en histoire de la philosophie des sciences, il n'y aurait pas de rupture. Loin de nous l'idée de prétendre généraliser l'application de cet outil méthodologique qu'est la notion de déplacement. Nous prétendons simplement confirmer plus rigoureusement, mais aussi de façon plus adaptée à l'époque concernée, notre hypothèse selon laquelle, des premiers travaux de Gaston Bachelard, remontant au début des années 1930, jusqu'au milieu des années 1990, avec les travaux de Gilles-Gaston Granger, Michel Serres, François Dagognet, Daniel Parrochia ou Philippe Quéau, nous assistons à l'affinement d'une position épistémologique assez uniforme d'inspiration, notamment quant à la question des modèles. C'est cette position évolutive, mais relativement unitaire, qu'il faudra alors confronter à notre question de la mathématisation et de la représentation fragmentée par la simulation.

---

[1] François Dagognet est revenu à maintes reprises, dans ses écrits, sur la filiation platonicienne, cartésienne, rousseauiste puis bergsonienne de cet iconoclasme des philosophes. Voir par exemple [Dagognet, F., 1984a], chapitre I, en entier.

[2] La caractérisation de prétendus dépassements nous autoriserait un peu trop vite à nous limiter au dernier épistémologue en date, censé récapituler et dépasser tous ses prédécesseurs, ou même à lui donner raison sous ce seul prétexte.

[3] In *Dérive à partir de Marx et Freud*, Paris, 10/18, 1973, pp. 15-16, cité par [Brügger, N., Frandsenn, F. et Pirotte, D., 1993], p. 15. On lit également dans *Pérégrinations*, Paris, Galilée, 1990, cité par [Brügger, N., Frandsenn, F. et Pirotte, D., 1993], p. 15 : « Les pensées sont des nuages. La périphérie d'un nuage n'est pas mesurable exactement, c'est une ligne fractale de Mandelbrot. Les pensées sont poussées ou tirées à des vitesses variables. Elles ont de la profondeur mais le cœur et la peau sont faits du même grain. Les pensées ne cessent pas de changer de position l'une vers l'autre. » La notion de « déplacement » a été introduite par Lyotard dans le cadre d'une critique du marxisme d'inspiration hégélienne. C'est la raison pour laquelle elle se présente comme infléchissant, ou déplaçant, la notion dialectique de « dépassement ». Nous pensons que cette notion, sans bien sûr permettre une ressaisie des pensées et des savoirs du passé dans le détail de leurs déterminations, rend tout au moins justice à leur dimension d'événements intellectuels, tout en permettant leur inscription dans une histoire compréhensive.

La critique des modèles mécaniques chez Pierre Duhem

Si Pierre Duhem n'a bien sûr pas réfléchi sur la simulation par ordinateur, il est connu pour avoir sévèrement critiqué le recours aux modèles mécaniques et pour avoir attribué la diversité de leurs usages à une certaine différence d'esprit entre les français et les anglais. Il ne nous appartient pas de discuter la pertinence de cette hypothèse psycho-sociologique[1] que l'on peut juger brutale ou simpliste. Resserrons plutôt ici l'argument sur ce qui le soutient. C'est en effet le rôle que tient l'imagination par rapport à la raison qui en constitue le cœur. Duhem critique le modèle mécanique en ce qu'il n'a pour fonction que d'exposer de façon sensible et imagée des lois empiriques. Cela a pour conséquence de ne plus nécessiter de la part du scientifique ni de l'étudiant ce travail intellectuel de synthèse que Duhem juge indispensable pour que l'on parvienne à véritablement connaître. Un modèle mécanique empêche l'esprit de synthétiser et de se rendre maniable ce qu'il conçoit. Il en est dès lors ralenti car embarrassé. L'imagination, dans ce contexte, est alors supposée gêner, ralentir et empêcher l'unité de vue et la synthèse de la pensée. Un esprit large, ample ou de géométrie, à la différence d'un esprit étroit, profond et abstrait, se rend ainsi coupable d'une « défaillance de la faculté d'abstraire »[2]. C'est donc en tant qu'il les conçoit comme des images visibles ou, plus généralement, comme des images sensibles, que Duhem rejette les modèles mécaniques. À l'inverse, il admet très bien que l'on ait recours à ce qu'il appelle des « analogies mathématiques ». Mais, très significativement, il tient à préciser qu'il ne s'agit là aucunement de modèles, à la différence de Maxwell qui n'hésitait cependant pas à parler dans les deux cas d'« analogies physiques ». Pour se distinguer de Maxwell et Boltzmann, Duhem tient donc à séparer essentiellement analogie physique et analogie mathématique, en situant son regard discriminant à la racine même des facultés intellectuelles mises en œuvre pour saisir ces analogies. C'est donc en tant qu'il risque de ne passer que pour une image du réel, une simple figuration, que le modèle mécanique doit être critiqué. Une telle figuration ne serait pas nécessairement fausse. Duhem ne pose pas le problème en ces termes-là. Elle serait incommode, donc à rejeter. En outre, parler des modèles comme d'images du réel a l'inconvénient majeur de donner une idée en revanche radicalement fausse de la nature et de l'objectif du travail du physicien. La science physique doit viser à terme la suppression de toute représentation sensible pour ne s'exposer de façon économe que sous une forme unifiée, théorique et formelle, selon Duhem.

Gaston Bachelard et la dialectisation des images figées[3]

Par la suite, dans la première moitié du vingtième siècle, l'épistémologue doit s'accommoder du fait que les modèles ont malgré tout persisté et se sont même développés. L'exemple des curieux avatars du modèle de l'atome de Bohr revient ainsi sous maintes plumes[4]. Peut-on encore demeurer iconoclaste à ce compte-là ? C'est encore possible si l'on ne critique plus directement le caractère sensible de l'image mais son caractère d'être donné, d'une part, d'autre part son caractère figé et enfin son caractère de ne prêter qu'à une cohésion mais pas à une cohérence. Aussi pour Bachelard, dans un premier temps (1938)[5], c'est parce que « rien n'est donné » et

[1] Selon la terminologie de Suzanne Bachelard (1979), p. 4.
[2] [Duhem, P., 1914], p. 105.
[3] Nous serons très succinct ici sur Gaston Bachelard. Pour un travail plus approfondi, voir [Varenne, F., 2004a].
[4] Par exemple *in* [Bachelard, G., 1951, 1965], pp. 68-69, [Lecourt, D., 1972], p. 49 et [Bachelard, S., 1979], p. 11.
[5] [Bachelard, G., 1938, 1980], p. 14.

« que tout est construit » que l'image sensible immédiate doit être mise à distance et niée[1]. Ainsi, « la raison n'a pas le droit de majorer une expérience immédiate » car « le *surobjet* est très exactement une non-image »[2]. Par la suite, Bachelard insistera plutôt sur le fait que l'image est toujours une « image vécue »[3] et que c'est la raison pour laquelle elle est figée. Le vécu est figeant alors que la raison connaissante est ouverte, dialectique et appliquée. La science a besoin de catégories ouvertes ; or l'image ou le modèle sont du côté de la fermeture de la pensée. Enfin, Bachelard insistera sur le fait qu'une représentation imagée produit l'impression d'une cohésion extérieure entre des choses hétéroclites dépourvues de réelle cohérence. Cette absence de cohérence fait que l'image est non formalisable, donc non connaissable rationnellement : « On ne formalise pas l'incohérent. On ne peut faire monter à la coexistence ce qui s'éparpille en coexistences hétéroclites. »[4] On voit bien là combien, sur tous ces points, Bachelard se distingue de Duhem. Mais, il est étonnant et significatif de s'apercevoir que, finalement, c'est pour un ensemble de raisons presque symétriques de celles de Duhem que Bachelard en vient néanmoins à cantonner, tout comme lui, le modèle au rôle d'un adjuvant transitoire : pour Duhem, la raison doit rassembler, abréger et synthétiser en s'élevant dans l'abstraction et en refusant l'image ; pour Bachelard, la raison doit ouvrir ses catégories parce que le rapport au réel est action, réalisation et non donation. Pour cela, elle doit nier l'image qui est donation première, fixité, fermeture et fausse interdépendance. La raison s'applique, pour Bachelard, mais dialectiquement, c'est-à-dire en niant le donné pour affirmer le construit ; et la principale cible de ces flèches dialectiques demeure toujours et encore l'image figée.

Henri Lefebvre et le refus de l'image mortifère

Evoquons succinctement la figure d'Henri Lefebvre. Cet auteur mériterait que l'on se consacre davantage à son œuvre, mais comme son influence fut assez limitée en son temps, notamment du fait de l'occupation quasi exclusive de la scène marxiste française par Louis Althusser ou Roger Garaudy, ses analyses concernant la société de la *mimèsis* furent assez peu relayées dans les milieux scientifiques, mis à part en anthropologie et en sociologie urbaine. Indiquons très brièvement que Lefebvre fait porter sa critique des modèles formels en science (essentiellement les modèles cybernétiques et théorico-structuralistes qui lui sont contemporains) sur le fait, très général et sociétal, que la *praxis*[5] tendrait de nos jours à s'enfermer et se laisser mourir dans les reproductions de toutes sortes, à tous les niveaux : imitations, simulations, simulacres sociaux et techniques[6]. Image et modèle tombent ainsi l'un et l'autre sous le coup de l'offensive de Lefebvre. Car ce qu'il y a de proprement vital, réel et vrai dans la *praxis* se verrait singé par les images et les modèles, de sorte que les hommes s'éloigneraient en fait davantage de ce réel, persuadés qu'ils sont, à travers ces pratiques de *mimèsis*, de s'en être rendus les maîtres. À l'encontre de cette tendance générale et afin que la *praxis* se revivifie, Lefebvre prône « un rassemblement des

[1] Cela dans le but de connaître et non, bien sûr, de poétiser.
[2] [Bachelard, G., 1940, 1983], pp. 139 et 144.
[3] [Bachelard, G., 1951, 1965], p. 68.
[4] [Bachelard, G., 1949, 1962], p. 41.
[5] Ce terme désigne chez Lefebvre « l'activité proprement sociale, c'est-à-dire les rapports entre les êtres humains, distingués par une abstraction légitime des rapports avec la nature et la matière (technique et « *poièsis* ») » *in* [Lefebvre, H., 1965, 2000], p. 27.
[6] Si les arguments fondamentaux de Lefebvre ne furent pratiquement pas considérés directement par la philosophie des sciences françaises intéressée par les modèles – alors que leurs conséquences critiques et sociologiques furent en revanche très relayées par l'épistémologie des sciences humaines, notamment en urbanisme et en sociologie –, leur influence sur la réflexion que Jean Baudrillard mène sur la civilisation des simulacres est indéniable. Voir [Baudrillard, J., 1978], *passim*.

« résidus » »[1], c'est-à-dire de tout ce qui, peu ou prou, est manqué par la modélisation et la simulation, et demeure comme résidu de toutes ces opérations mimétiques. Ce que craint donc Lefebvre, c'est que l'image morte saisisse le vif de ce qu'elle mime[2]. L'iconoclasme de Lefebvre est finalement assez classique[3] en ce qu'il assimile l'image, comme Hegel auparavant la catégorie kantienne, à une saisie mortifère, donc partielle et trompeuse, de ce qui est vif et authentiquement vivant.

Le modèle cybernétique ne doit pas être une « figuration » selon Georges Canguilhem

La génération de Canguilhem et de ses élèves se verra par la suite confrontée de plein fouet au fort développement des modèles cybernétiques dans les années 1950-1960, notamment en biologie. La position philosophique de Canguilhem quant aux modèles se présente en deux temps. D'une part, et dans la lignée de Bachelard, c'est en procédant à une réévaluation de la fonction de représentation ordinairement attribuée aux modèles qu'il va parvenir à penser et à accepter leur développement considérable : les modèles seront réputés valoir essentiellement comme outils heuristiques dans la construction de la science et non point du tout comme représentations ou figurations. Cet argument présente ainsi une forme affaiblie du rationalisme dialectique de Bachelard. La tâche principale de l'épistémologue consistera à s'accommoder du recours au modèle mais à rappeler sans cesse aux scientifiques qu'il ne doit pas les séduire au point qu'ils en fassent un substitut du réel ou un fétiche. D'autre part, le changement de nature qui, à la même époque, affecte les modèles (ils deviennent quasi-exclusivement mathématiques) encourage Canguilhem à soutenir la thèse interprétative de la légitimité purement formelle des modèles ; ce qui le remet ainsi dans les pas mêmes de Duhem : les modèles ne valent que par leur trame formelle car ils s'appuient sur un isomorphisme, sur un rapport purement formel donc. Dès lors, et assez logiquement, l'épistémologie française, faisant traditionnellement la part belle aux progrès des formalisations mathématiques, peut ainsi faire volte-face sur la question des modèles et les accepter dans la mesure même où ils semblent ne plus présenter qu'une nature purement formelle, linguistique, et qu'une fonction purement heuristique. Ainsi, la critique de Duhem peut revenir sous une nouvelle forme : « illustration n'est pas figuration »[4] prévient Canguilhem. Par un effet de déplacement induit par le spectacle des développements irrépressibles du modélisme en science, le terme d'« illustration » devient synonyme, chez Canguilhem, de ce que Duhem appelait auparavant l'« analogie mathématique ». Par là, Canguilhem prend acte du fait qu'à son époque, le terme de « modèle » désigne tout à la fois des analogues matériels (modèles physiques) et des systèmes de formulations mathématiques polyvalents[5] (modèles mathématiques). Il y a donc un moyen pour Canguilhem de réhabiliter les modèles mais à condition de les apparenter à des analogies seulement mathématiques. Les modèles ne seraient ainsi légitimés que par leurs

[1] [Lefebvre, H., 1965, 2000], p. 31.
[2] « Cette fois, la mort imite la vie : elle la caricature », [Lefebvre, H., 1965, 2000], p. 224.
[3] La critique du caractère mortifère de l'image peut classiquement être ici apparentée à la critique des catégories kantiennes par Hegel : elles figent ce qui est par nature vivant. Selon nous, ce déplacement propre à la pensée de Lefebvre – et qui pourrait paraître à première vue paradoxal - s'autorise du spectacle contemporain d'une emprise inédite et apparemment totale de la technique et de son cortège de concepts supposés figeants sur les images et les modèles : télévision, automates, modèles cybernétiques, etc. Le concept aurait de nos jours saisi l'image et lui aurait délivré le poison mortel que Hegel avait su déceler naguère en lui. Dès lors la critique philosophique qui, du temps de Hegel, avait d'abord porté sur les seules formes conceptuelles peut s'étendre légitimement aux images construites par la technique et la science contemporaines et ainsi s'épanouir dans un nouvel iconoclasme.
[4] [Canguilhem, G., 1963, 1968], p. 313. Suzanne Bachelard reprendra mot pour mot cette phrase : « l'illustration n'est pas la figuration », (1979) p. 8. Daniel Parrochia écrira également : « illustration n'étant pas figuration » (1990), p. 221.
[5] Car valant dans différents domaines scientifiques.

squelettes formels : on retrouve donc bien là, malgré tout et sous une forme déplacée, le privilège que Duhem avait déjà conféré à l'abstraction. Mais c'est l'argument soutenant ici cette valorisation qui est nouveau et qui, sous cette forme originelle, sera souvent répercuté par la suite : Canguilhem rappelle que le 19ème siècle, avec Fourier, avait fait la découverte de « la polyvalence des théories mathématiques par rapport au réel »[1]. Fourier, en étudiant les théories mathématiques pour elles-mêmes, aurait fait surgir « des analogies sur des terrains expérimentaux *a priori* sans rapports »[2]. Selon la lecture de cette philosophie des sciences, le modèle est donc toléré mais dans la mesure même où il est désincarné. L'iconoclasme s'accommode ainsi des récents développements de la science en se réfugiant dans un mathématisme de la structure, déjà bien en vu en France, notamment dans la perspective bourbakiste. Comme conséquence de cela, les modèles cybernétiques de la biologie ne peuvent être que des « simulateurs », c'est-à-dire des automates qui imitent les seules performances visibles du simulé et non sa constitution, ni même sa logique interne. En effet, « il n'y a d'analogie valable [entendons mathématique] qu'au sein d'une théorie » puisqu'il faut pour cela pouvoir établir une application isomorphe terme à terme entre la théorie mathématique et le domaine expérimental concerné. Or (et c'est bien là que se tient la différence entre l'emploi des modèles en physique et leur emploi en biologie selon Canguilhem), il n'y a pas, à proprement parler, de biologie mathématique et théorique : « les modèles conduisent à l'établissement de correspondances analogiques au niveau d'objets […] concrètement désignés » et non pas au niveau des éléments théoriques constitutifs de ces mêmes objets, éléments qui pourraient expliquer et anticiper l'expérience. Pour Canguilhem, les modèles en biologie restent donc des simulateurs parce qu'ils ne permettent pas la constitution *a priori* de concepts théoriques. Il ne s'y trouve pas de construction mathématique et *a priori* de concepts théoriques[3]. Il n'y a de construction qu'analogique. Les modèles ne peuvent rester que de surface pourrait-on dire ; et ils servent simplement à présenter des « totalités indécomposables » sur lesquelles on peut procéder à des substituts d'expérimentations parce qu'ils sont en eux-mêmes des « substituts de représentation »[4]. Et c'est là que peut s'imiscer l'idéologie. Ce faisant, Canguilhem maintient ouverte, quoique étroitement, la voie à une légitimation du recours au modèle en biologie, à titre d'objet expérimental substitutif.

La critique de toute forme d'idéalisme : Louis Althusser et Alain Badiou

Dans notre chapitre sur l'école de modélisation française, nous avons déjà présenté dans ses grandes lignes, cette épistémologie néo-marxiste des modèles. Nous y reviendrons ici juste pour en rappeler l'idée centrale : la modélisation, entendue comme forme particulière de recours aux images, est accusée de positivisme et donc d'idéalisme philosophique. L'hypothèse épistémologique est liée à une option ontologique : la nature de la science comme celle de son objet doivent être dialectiques. C'est ainsi, selon le terme d'Althusser, que la philosophie doit *fonctionner*.

En 1969, Alain Badiou adapte la même argumentation à la théorie mathématique des modèles. Selon lui, « pour l'épistémologie des modèles, la science n'est pas un procès de transformation pratique du réel, mais la fabrication d'une image plausible »[5] déterminée par des

[1] [Canguilhem, G., 1963, 1968, 1994], p. 312.
[2] [Canguilhem, G., 1963, 1968, 1994], p. 312.
[3] Ce vocabulaire kantien nous paraît en effet légitimement appelé par le passage de l'article de Canguilhem que nous analysons ici.
[4] [Canguilhem, G., 1963, 1968, 1994], p. 311.
[5] [Badiou, A., 1969], p. 14.

intérêts de classe : « le modèle appartient à la métathéorie sécurisante d'une conjoncture »[1]. Donc les modèles « ne sont pas des constructions intra-scientifiques »[2]. Finalement, comme Bachelard qui luttait contre le modèle-image qui fascine et fige la recherche[3], Alain Badiou pense que l'image est appelée à être dialectisée. Elle ne vaut qu'en ce qu'elle est niée. Ainsi, on retrouve là un thème assez courant et constant dès lors qu'il s'agit de marginaliser l'image reproductrice en science. Aux formalismes des époques syntaxiques ou sémantiques du positivisme logique, l'épistémologie française répond par un « praxisme » inspiré de Marx.

Les modèles-signes et leur circulation selon Michel Serres

Michel Serres est un philosophe habité par le besoin de vivre des ruptures par rapport à la culture de son temps, tant philosophique que scientifique. Et c'est en science qu'il croit reconnaître les premiers signes d'une sorte de rédemption, voire d'auto-purification et d'expiation, qu'il attend de la part de cette culture, spécialement depuis l'horreur des camps et d'Hiroshima[4]. Il perçoit chez Bourbaki comme chez Léon Brillouin, l'auteur de *La science et la théorie de l'information*, paru en 1959, l'amorce d'une épistémologie intra-scientifique et fondée seulement sur des rapports de structures, façon pour lui propice de faire oublier le fond substantiel d'une culture qui lui pèse, en y demeurant pourtant, mais en ne lui conservant que ses formes[5]. En 1968, paraît alors sa thèse détonante : *Le système de Leibniz et ses modèles mathématiques*[6]. L'hypothèse principale de ce travail est la grande proximité qu'il semble y avoir, selon son auteur, entre les théories mathématiques contemporaines (particulièrement la théorie des modèles[7]) et le système

[1] [Badiou, A., 1969], p. 15.
[2] [Badiou, A., 1969], p. 15.
[3] [Bachelard, G., 1951,1965], pp. 68-70.
[4] Voir [Serres, M. et Latour, B., 1992, 1994], p. 29 : « Je demande à mes lecteurs d'entendre exploser ce problème dans toutes les pages de mes livres. Hiroshima reste l'unique objet de ma philosophie. »
[5] Sans vouloir prétendre expliquer totalement et naïvement le contenu d'une philosophie par le contexte de sa naissance, il nous paraît cependant possible de mieux comprendre cette soif assez générale de structures et de formalismes – soif qui s'est particulièrement manifestée après la guerre, mais non point dans l'immédiate après-guerre – si l'on fait l'hypothèse que la pensée se trouvait là en situation de continuer à se développer tout en détestant ses productions récentes ainsi que ses racines si coupables de les avoir rendues possibles. Assez vite (une fois passée la génération de Sartre), à partir des années 1950, elle aurait travaillé à la liquidation de ses propres contenus, de ses vécus, de ses enracinements. Elle aurait par exemple eu le choix soit d'accuser et de répudier directement la langue allemande (comme Wladimir Jankélévitch), soit de vider la pensée marxiste de ses résidus non purement théoriques et formels (comme l'anti-humanisme d'Althusser) soit de marxiser ou formaliser la phénoménologie pour n'avoir plus à suivre Heidegger (comme Jean-Toussaint Desanti et Gilles-Gaston Granger), soit d'épouser passionnément les paradigmes de l'information et de la sémantique formelle alors naissants (comme Gilles-Gaston Granger à nouveau et comme Michel Serres avec son hermétisme). On peut trouver chez [Breton, P. et Proulx, S., 1989], pp. 213-222, une lecture psychologisante du même type et qui décèle chez Norbert Wiener, fondateur de la cybernétique, ce souci conscient de répudier toute une culture meurtrière en reconstruisant une vision du monde déshumanisée, laissant ainsi la société aux prises avec les seuls automates, désormais plus dignes de confiance et paradoxalement plus humains. Dans un même esprit, François Dosse suggère également que le structuralisme correspond à « un moment de l'histoire occidentale de détestation de soi », [Dosse, F., 1992, 1995], p. 16. Selon nous, le développement de l'épistémologie française d'après-guerre fournit une sorte de manifestation localisée mais très représentative de cette détestation de soi, comme nous allons le voir encore dans la suite. Il est somme toute assez logique qu'une telle tendance à la liquidation des contenus ait plus particulièrement régné dans une discipline intellectuelle où l'on prend traditionnellement comme objet (et donc où l'on prend en quelque sorte moralement et psychiquement en charge) le développement de la culture et des savoirs : l'épistémologie. Pour finir à ce sujet, signalons l'essai anthropologique de Pascal Bruckner (1983, 1986) qui semble aller dans le même sens puisqu'il stigmatise la culture de la culpabilité qui serait propre à l'Occident et qui se serait plus fortement manifestée en cette fin du 20ème siècle. Son auteur nous paraît cependant avoir manqué de précision et de rigueur historique. À un niveau très général, il veut voir l'origine d'une telle culpabilité dans une certaine essence de la culture occidentale. Ce qui nous paraît très contestable et inutilement généralisateur, cela au vu des indices plus précis et mieux différenciés dont nous pouvons disposer.
[6] [Serres, M., 1968].
[7] « Soit L un langage formel, F une formule de L, et I une interprétation du langage L. On dit que I est un modèle de la formule F si cette formule est vraie pour l'interprétation I », [Wagner, P., 2002], p. 19. « L'interprétation d'un langage est

philosophique de Leibniz. Rappelons que, selon Michel Serres, le système de Leibniz, dans et malgré son éparpillement, témoignerait de la présence d'une « structure » formelle commune dotée de nombreux « modèles » (au sens donc de la théorie mathématique des modèles) qui la rendraient vraie dans de nombreux domaines hétérogènes : métaphysique, arithmétique, morale, droit, politique, etc. Dans ses travaux ultérieurs, Michel Serres a utilisé cette même assimilation, mais dans le sens inverse, afin de réfléchir, à partir de la pensée de Leibniz, sur les savoirs contemporains : « Par des chemins qu'il projetait aveuglément, les sciences en sont venues à un état que Leibniz décrivait : elles forment ou tendent à former, un 'corps continu comme un océan', qu'il est arbitraire de diviser en mers Ethiopique, Calédonienne, etc. »[1] C'est alors l'occasion pour Michel Serres d'affirmer la caducité de la référence sémantique en science : les concepts scientifiques ne valent pas en ce qu'ils se réfèrent à des objets mais en ce qu'ils font circuler de façon réticulaire une information sans contenu. Il faudrait alors reconnaître que la philosophie des sciences est devenue une « philosophie de la communication sans substance, c'est-à-dire sans fixité ni référence »[2]. Michel Serres vise ici le remplacement de la consistance des signes et des représentations scientifiques par leur seule résistance et leur relative invariance. Exister valablement pour une représentation scientifique consiste donc dans le seul fait de pouvoir résister aux transformations que pourrait lui occasionner sa communication. Etre pour une représentation, c'est agir pour se conserver à travers toutes les « ductions » : induction, déduction, production, traduction. On voit là combien, conformément au diagnostic de François Dosse, l'ontologie résistiviste de Bruno Latour pourra par la suite trouver en Michel Serres une de ses sources d'inspiration[3]. Mais pour Michel Serres, l'enjeu est tout d'abord de parvenir à détruire les vieilles hiérarchies cartésienne, kantienne et comtienne des savoirs[4]. Michel Serres se persuade ainsi que deux écoles de pensée se sont toujours combattues dans l'histoire des idées, toutes deux transgressant les prétendues frontières entre sciences et philosophie :

« Aristote oppose à Platon, Leibniz à Descartes, Cournot à Auguste Comte, etc., avec toutes les variantes que l'on voudra et les précisions nécessaires, une conception élémentaire et grammaticale du savoir à une canonisation de l'exercice visuel. À une géométrie que l'intuition domine répond une algèbre qu'une logique organise […] Les sciences contemporaines sont filles de la première lignée : formalistes, analytiques, référées chacune, à un alphabet d'éléments, grammaticales, signalétiques… Leur air de famille est si prononcé qu'on se prend de nouveau à rêver d'une mathesis universalis *[…] La mathématique a voulu prendre l'intuition et lui tordre son cou […] l'*ancien sensorium *est soumis au calcul. »*[5]

---

définie par la donnée d'un ensemble (appelé « ensemble de base »), et par une interprétation adéquate de chaque symbole [du système formel] dans cet ensemble de base », *Ibid.*, p. 17. Pierre Wagner précise que le premier résultat qui relève de cette théorie est le théorème de Löwenheim (1915) tandis que son affirmation comme théorie à part entière remonterait seulement au début des années 1950. L'expression « théorie des modèles », due à Tarski, remonte à 1954. *Ibid.*, p. 20.

[1] [Serres, M., 1972], pp. 9-10. Voir également : « La situation analysée ici est bien de type leibnizien […] », *Ibid.*, p. 28. Ou encore : « [Le système de la science] est donc un système au sens leibnizien, comme on a dit, harmonique, sans pré-établisssement », *Ibid.*, pp. 35-36.

[2] [Serres, M., 1972], p. 13. Plus loin, M. Serres ajoute : « J'ai tenté de montrer que cette variation [sur le terme *épochè*] était épuisée, que le problème de la référence était, au sens technique, un problème fini. Le nouvel esprit [scientifique], c'est la pensée sans référence ; *le transport est la pensée même*, l'invention efficace dans son éveil et l'étrange de ses aurores », *Ibid.*, pp. 15-16. C'est nous qui soulignons.

[3] L'historien des sciences humaines, François Dosse, intègre ainsi Bruno Latour, aux côtés de Michel Callon, dans la filiation intellectuelle directe de Michel Serres [Dosse, F., 1995, 1997], pp. 121 *sqq*. Nous reviendrons plus loin sur cet auteur.

[4] [Serres, M., 1972], chapitre 1, *passim*.

[5] [Serres, M., 1974], pp. 16-17.

La critique du recours à l'image reproductrice ou intuitive en science est donc, on le voit, la substance même du propos de Michel Serres. C'est pourquoi, même s'il ne le précise pas explicitement, il ne fait aucun doute pour lui que la notion de modèle ne peut être entendue que dans son sens mathématique tardif. L'iconoclasme est donc de principe dans ses premiers travaux. Ajoutons qu'en l'occurrence, le déplacement par rapport à Bachelard est à situer dans une nouvelle loi des trois époques, plus précisément dans le passage de ce qu'il appelle l'état subjectif-objectif supposé représenter la lecture bachelardienne à l'état objectif-objectif[1] supposé la dépasser. Ce dernier qualificatif désigne un état où la science devient exclusivement attentive aux marques que portent les choses sur elles, telles des inscriptions, des structures écrites, « indépendantes[s] des ce[s] chose[s] »[2] elles-mêmes. Cet état « tente de déchiffrer le langage des objets appliqués aux objets, en reconstituant, quand il se peut, ce langage objectif »[3]. La science est donc vouée à intercepter, interférer[4] avec des messages insignifiants, mais circulant entre les objets, d'objet à objet, et à destination préférentielle d'aucun sujet. La critique bachelardienne, par contraste, restait donc trop axée sur le sujet. C'est-à-dire que les procédures à la fois théoriques et technico-expérimentales (la phénoménotechnique) servant à construire l'objet de la science bachelardienne peuvent encore s'interpréter comme la simple inversion de la faveur accordée naguère par Descartes au sensible en une faveur accordée à l'intelligible, avec l'inconvénient de désigner une fois encore ces procédures comme accessibles au seul sujet et à destination de lui seul : d'où la qualification d'état subjectif-objectif. La déformation de l'iconoclasme de Bachelard vers celui de Michel Serres se produit très précisément selon l'axe de contestation suivant : immanence aux choses mêmes des messages susceptibles de colporter un savoir sur ces choses (Serres) *versus* transcendance du sujet travaillant le monde pour constituer les choses malgré tout encore comme objets d'intellections, et cela quand bien même le pluralisme et le relativisme de ces intellections seraient reconnus (Bachelard).

Notons toutefois que, dans des travaux plus récents[5], Michel Serres semble accorder plus d'importance aux images reproductrices, notamment au vu du développement considérable des images de synthèse. Michel Serres rappelle que certaines de ces images sont en effet construites intégralement à partir de signaux de diverses natures, comme les images satellites, par exemple. Ce sont des objets de synthèse aux colorations et aux formes multiples, plus complexes que ce que nous pourrions réellement voir d'un satellite avec nos seuls yeux[6] ou à partir de la traduction sensible d'un seul type de signal physique. Elles s'offrent à notre intuition sensible comme objet global en vue d'une interprétation ou de l'application de modèles. Michel Serres insiste sur le fait nouveau que, dans ces images, l'exhaustivité prend le pas sur l'abstraction, au rebours de toute

[1] [Serres, M., 1972], p. 14.
[2] [Serres, M., 1972], p. 94.
[3] [Serres, M., 1972], p. 95.
[4] Cet usage d'allure métaphorique - quoique presque directement repris de sa thématisation scientifique, d'où l'idée d'une épistémologie intra-scientifique propre à Serres – de la notion d'« interférence » s'autorise notamment des études de Léon Brillouin sur les interféromètres et plus généralement sur les supposées limites théoriques de toute expérience scientifique : « Nous avons étudié un certain nombre d'expériences et nous sommes parvenus au résultat général qu'est le principe de néguentropie de l'information qui exprime que toute information résultant d'observations physiques doit être payée par un accroissement d'entropie », [Brillouin, L., 1959, 1988], p. 221. Rappelons que, depuis l'époque de Brillouin, ce résultat a été fortement contesté. Il a notamment été avancé l'idée que la création de néguentropie serait due à l'effacement d'information qui est nécessité par toute acquisition d'information, non à cette acquisition elle-même. Pour ces mises au point, voir les travaux de Rolf Landauer, Charles Bennett et Seth Lloyd. De ce dernier auteur, on pourra consulter un article paru dans « Physical Review A », November 1997. Voir également [Segal, J., 2004], pp. 622-628.
[5] [Serres, M., 1997], préface.
[6] Il s'agit donc d'une forme de sur-reproduction et non d'une représentation sélective.

une tradition de représentations scientifiques. Dans ces objets de synthèse, le caractère imagé et sensible qui sollicite notre intuition visuelle est de nouveau là. Ce genre de représentation scientifique ne peut donc plus être considéré comme simplement abstractif ou condensant. Au contraire, ces objets sont surinformés pour notre intuition. En utilisant à rebours la terminologie bachelardienne, nous pourrions dire que ce sont des « sur-objets » sur-sensibles ; car s'ils dépassent le statut de l'objet sensible habituel, ce n'est pas en tant qu'ils nient ou dialectisent sa sensibilité, mais en tant qu'ils nous rendent nouvellement sensible sa complexité cachée. Dans ce changement de perspective nous voulons voir un revirement majeur dans la pensée de Michel Serres face à la réalité d'une technique et d'une méthode désormais bien présentes et incontestables : la simulation, l'imagerie virtuelle et la réalité augmentée. On ne peut plus dire que l'informatique est condamnée à n'étendre que la métaphore informationnelle et communicationnelle à toute pratique scientifique.

Suzanne Bachelard et le mariage de la phénoménologie avec la dialectique iconoclaste

La contribution de Suzanne Bachelard au colloque *Élaboration et justification des modèles* organisé, en 1978, par Pierre Delattre et Michel Thellier, souvent citée et reprise dans ses conclusions[1], constituera un point de repère épistémologique dans le paysage français de la réflexion sur les modèles. Dans une perspective d'épistémologie historique, elle y reprend les thèses déjà développées par les auteurs que nous avons évoqués, mais en explicitant et en déplaçant un certain nombre des attendus qu'elles recèlent. Tout d'abord, la thèse de la découverte de la polyvalence des théories devient cette fois-ci fondamentale. Et Suzanne Bachelard l'assoie clairement sur ce que nous appellerions volontiers une vision mathématiste de la construction des sciences de la nature. En effet, elle tient à préciser que, parallèlement à la diversification des domaines de la physique déjà largement reconnue par les historiens des sciences (« électrostatique, électrodynamique, thermodynamique, électromagnétisme »[2]), se produisait, avec la « découverte » des géométries non-euclidiennes puis de leurs modèles euclidiens, un éclatement de la classification traditionnelle des sciences mathématiques ; ce qui aurait constitué un choc en retour sur la modélisation mathématique tous azimuts de la physique qui lui succéda. Suzanne Bachelard en conçoit alors l'idée que « c'est la polyvalence théorique qui légitime la substitution à une étude expérimentale compliquée d'une autre étude expérimentale plus accessible ». De là elle déduit le caractère essentiellement « ostensif » de tout modèle, qu'il soit abstrait ou concret. Cela lui permet d'unir sous une même fonction les modèles des sciences de la nature et ceux de la théorie mathématique des modèles. Dès lors, il semble que l'on soit très proche d'une conciliation avec ce que nous avons déjà indiqué comme étant la problématique proprement anglo-saxonne de la maîtrise mathématique : à savoir celle de la maîtrise *des* mathématiques par notre pensée et pas seulement celle de la maîtrise du monde *par* les mathématiques. Un tel souci était encore présent, en 1967, chez le physicien Louis de Broglie puisqu'il demandait à la microphysique contemporaine de se livrer à nouveau à l'usage de « représentations concrètes »[3]. Mais Suzanne Bachelard s'empresse très vite de retomber dans la

[1] Elle est notamment citée par [Parain-Vial, J., 1983, 1985], p. 139, [Parrochia, D., 1990], p. 219 et [Orange, C., 1997], pp. 27 *sqq*.
[2] [Bachelard, S., 1979], p. 4.
[3] Voir ce propos conclusif de Louis de Broglie : « La représentation concrète de la réalité physique dans le cadre de l'espace et du temps avec connexion causale a été à l'origine de tous les progrès de la science moderne : elle est conforme aux tendances profondes de notre esprit et nous cessons de bien comprendre si nous nous en écartons », [Broglie (de), L., 1967], p. 724.

valorisation de l'abstraction mathématique en précisant par exemple que « le modèle qui donne à voir ne donne à voir qu'à l'initié qui connaît le support conceptuel qui justifie ce modèle »[1]. Autrement dit, le pouvoir « ostensif » des modèles n'est perceptible que par une petite élite d'hommes qui ont su s'abstraire d'abord et avant tout du sens commun. Et elle en conclut : « On peut dire finalement qu'il *n'y a pas* de modèle figuratif. »[2] Elle s'explique encore : « Le modèle n'est en aucun cas *imitation* des phénomènes. »[3] Plus exactement, il imite de manière sélective : « Le modèle, copie du réel, serait ou trivial dans la mesure où ce réel est dominé par la connaissance scientifique, ou chimérique dans la mesure ou de l'inconnu ou du mal connu subsiste. » D'où l'idée que « loin de fonctionner comme une copie, le modèle fonctionne comme opérateur sélectif »[4].

Le modèle mathématique dans les sciences comme dans les mathématiques elles-mêmes est donc défini à partir de sa fonction de sélection, de simplification et, par conséquent, de la fonction de monstration qui en résulte. C'est un schéma théorique simplifié, une fiction mathématique sélective et orientée. Car cette thèse doit en effet logiquement mener à un modélisme perspectiviste et égalitaire si l'on peut dire, les modèles étant tout aussi acceptables les uns que les autres et aussi nombreux que les points de vue ou que les objectifs que l'on se fixe. Mieux que cela : le fait que le modèle ne soit pas identique à ce qu'il modélise[5], qu'il ne soit pas trivial en ce sens, participe en creux à l'élaboration du savoir, car il stimule des programmes de recherches expérimentales ou théoriques nouvelles. En ce sens, le modèle est un « *médiatiseur* » selon le terme même de Suzanne Bachelard qui reprend à son compte, en cette occasion, la qualification d'« abstrait-concret » introduite par Gaston Bachelard. Or il peut tenir cette fonction parce qu'il a pour vocation d'être saisissable dans son ensemble par notre esprit, selon l'expression de Jean Perrin reprise par l'auteur[6].

À la fin de son article, Suzanne Bachelard évoque très succinctement la simulation informatique et la reconnaissance des formes mais en les cantonnant significativement à l'analyse de données et au déploiement de modèles mathématiques. Pour elle, il n'est pas de simulation informatique sans modèle mathématique : « même la visualisation informatique, qui pourtant est marquée par le label de l'immédiateté de la sensation, repose sur une lourde assise théorique »[7]. Elle se rend ainsi coupable de confondre la théorie qui autorise l'analyse de données (car leur donnant une place dans un système formel) et le modèle sous-jacent à la synthèse informatique d'images et qui est loin de valoir comme théorie. Finalement, moyennant cette confusion, la visualisation du modèle ne serait donc qu'une confirmation et une manifestation tout à fait marginale de sa nature d'« abstrait-concret », déjà exposée précédemment. La simulation informatique ne ferait que confirmer le diagnostic selon lequel les modèles mathématiques seraient essentiellement des opérateurs formels de sélection servant l'objectif de nous faire parvenir à une conception plus claire, quand bien même elle en serait caricaturale, des processus réellement à l'œuvre.

---

[1] [Bachelard, S., 1979], p. 8.
[2] [Bachelard, S., 1979], p. 8. C'est l'auteur qui souligne.
[3] [Bachelard, S., 1979], p. 8. C'est l'auteur qui souligne.
[4] [Bachelard, S., 1979], p. 9.
[5] Ce que Mary Hesse appelait l'« analogie négative ».
[6] [Bachelard, S., 1979], p. 13.
[7] [Bachelard, S., 1979], p. 14.

François Dagognet et la nécessaire « transfiguration » dans toute figuration

On pourrait s'étonner de voir figurer François Dagognet dans un exposé analytique et généalogique des positions iconoclastes en philosophie des sciences et des modèles. Nous ne nous cacherons pas le fait que ce philosophe a en effet grandement contribué à la prise de conscience générale et à la mise au jour de ce « vice » dont il a lui-même montré combien il pouvait être consubstantiel à nombre d'entreprises philosophiques. Etant entendu qu'*a priori* notre tâche se présente ici comme plus ardue, nous essaierons de restituer le sens précis de la réhabilitation philosophique proposée par François Dagognet : tout d'abord à la lumière des critiques qu'il a formulées à l'encontre des philosophes iconoclastes, ensuite, à la lumière des arguments qu'il a fournis pour constituer une philosophie de l'image alternative et à part entière. Notre objectif est de nous rendre à même de déceler la teneur précise de l'iconoclasme résiduel que nous lui supposons.

Commençons donc par ses critiques de la tradition iconoclaste. Un des premiers arguments de François Dagognet consiste à faire remarquer que les philosophes des sciences iconoclastes auraient tort d'exagérer l'importance de « la mobilité, de la fluence du savoir »[1] à l'encontre de la désespérante stabilité de l'image. Ce serait en effet parfois à bon droit que la représentation scientifique figerait : comme le tableau de la classification des éléments de Mendeleïev, elle peut devenir une « Table de la loi », une référence durable. C'est pourquoi, en l'occurrence, ce tableau trône encore dans tout laboratoire. De plus, vouloir à toutes forces que le savoir soit héraclitéen, c'est en fait se rendre coupable de le dissoudre et de le dévaloriser sous prétexte de le glorifier[2]. Par cette indication, nous sommes donc à même de comprendre que c'est notamment l'argument bachelardien et néo-marxiste de la fixité de toute image qui est ici attaqué. Pour François Dagognet, on ne peut donc être iconoclaste sous le seul prétexte que l'image fige ce qu'elle représente, car il arrive au savoir de prendre durablement cette forme figée qu'on lui dénie.

Ensuite, ces philosophes peuvent également objecter que l'image « raccourcit »[3] ce qu'elle représente. La représentation imagée est réputée être l'équivalent d'un rangement « commode, mais superficiel et réducteur »[4]. Or, là encore, l'exemple du tableau de Mendeleïev indique combien une classification peut être non pas un classement de ce que l'on connaît déjà, mais bien une « classification qui nous livre elle-même les vraies connaissances et réussit à descendre à la racine des éléments regroupés »[5]. Comme l'indiquent l'histoire et les avatars de ce tableau des éléments chimiques, on a ici affaire à une représentation qui devance le savoir et oriente les recherches. François Dagognet nous invite à percevoir ici la profondeur de certaines représentations figuratives en science. Nous reviendrons plus loin sur la théorie de l'image qui lui est propre et nous verrons combien elle prend acte de cette faculté de révélateur du réel que peut parfois posséder une image. Poursuivons encore sur ses arguments anti-iconoclastes.

François Dagognet prolonge son argumentaire en visant plus particulièrement ceux qui prétendent que l'image manifeste toujours une idéologie. En effet, notre auteur précise que, selon les « théories marxistes trop traditionnelles »[6], toute image serait censée figer les réelles forces de production par des forces réactives de reproduction, en installant une forme de *statu quo*. Mais

[1] [Dagognet, F., 1969, 2002], p. 197.
[2] « On prétend bien le sauver, mais on le noie en réalité dans son propre flot », [Dagognet, F., 1969, 2002], p. 197.
[3] [Dagognet, F., 1969, 2002], p. 206.
[4] [Dagognet, F., 1969, 2002], p. 207.
[5] [Dagognet, F., 1969, 2002], p. 207.
[6] [Dagognet, F., 1973], p. 9.

François Dagognet tient à mettre au jour et à réhabiliter ce qui, selon lui, constitue la cible implicite de tout argument marxiste qui viserait l'image-idéologie : la permanence suspecte de l'outil[1]. Selon notre auteur, ce serait parce que l'image reproductrice, tel l'outil du travailleur, demeure la même et identique à soi, à travers tous les processus de production, qui pourtant la mobilisent, qu'elle serait ainsi dénigrée. Un tel outil qui sort indemne de son usage est en effet suspecté de ne servir que d'auxiliaire de peu de poids, dans tous ces processus. Or, là encore, la thèse de la reproduction figeante n'est pas tenable pour François Dagognet, car on ne devrait pas valoriser le processus seul au détriment de l'outil qui le sert : l'un et l'autre doivent être considérés. Image et modèle sont des outils qu'il ne faut pas sous-estimer.

François Dagognet rappelle également que, pour Rousseau par exemple, tout redoublement, toute transposition, toute reproduction ou représentation (scientifique, artistique ou politique) nous dépossède de l'original et nous exile ainsi de l'authentique[2]. Il signale combien cette peur de l'exil, déjà présente chez Platon, s'origine dans l'effroi qu'éprouve l'homme face à son propre redoublement, à sa propre image dans le miroir[3]. Ce même exil devient chez Bergson une désappropriation de notre pensée par les images et est, comme tel, également condamné : « Les images ne seront en effet jamais que des choses et la pensée est un mouvement. »[4] François Dagognet, voulant défendre l'écriture ainsi que toute forme de graphie, rétorque alors : « De ce que le vocalisé s'insinue dans le texte, il ne s'ensuit pas que l'imprimé ne le dépasse pas. »[5] L'image tient sa force non pas de ce qu'elle serait à même de traduire dans l'espace, totalement et sans restes, toute forme de vocalisation vécue dans le temps, mais plutôt au fait qu'elle déploie nouvellement ce vécu et l'ouvre à des dimensions inédites. Or ce déploiement spatialisé de l'« intérieur » temporel est nécessaire à l'œuvre de civilisation, selon François Dagognet. C'est la seule manière d'échapper à notre narcissisme : « Pour Freud lui-même la culture va de pair avec la dévocalisation, une décorporéité contre laquelle l'enfant et l'homme regimbent. »[6] L'iconoclasme est donc ici considéré comme le fruit d'une philosophie du refus de la civilisation, voire du refus de l'accession des hommes à la majorité intellectuelle. Dans cet argument précis, la critique de l'iconoclasme est donc plutôt de nature anthropologique et politique.

Le dernier argument anti-iconoclaste que l'on peut trouver chez François Dagognet s'attaque spécifiquement à l'idée philosophique commune selon laquelle toute duplication serait le véhicule d'une tricherie. Mais François Dagognet rétorque en substance qu'il ne faut pas confondre image et simulation ou dissimulation. C'est alors l'occasion pour notre auteur de fustiger à maintes reprise la simulation[7]. Il faut d'abord reconnaître selon lui (en conformité avec le vieil argument du début du *Cratyle*) qu'on ne saurait faire d'une image, en l'occurrence d'un meuble copié sur l'authentique, une « dissimulation-simulation » : « on ne peut ni ne sait décalquer […] »[8]. La copie parfaite est logiquement impossible, François Dagognet en convient. Donc notre iconoclaste, qui condamnerait toute image sous prétexte qu'elle fait semblant d'être ce qu'elle n'est pas, se rendrait coupable d'une assimilation erronée entre image et simulation. Autrement dit, il a tort parce que toute image n'est pas condamnée à n'être qu'une simulation.

---

[1] [Dagognet, F., 1973], p. 9.
[2] [Dagognet, F., 1973], chapitre I et [Dagognet, F., 1984a], pp. 31-35.
[3] [Dagognet, F., 1984a], pp. 20-22.
[4] [Bergson, H., 1896, 1939, 1993], p. 139, cité par [Dagognet, F., 1973], p. 26.
[5] [Dagognet, F., 1973], p. 26.
[6] [Dagognet, F., 1973], p. 40.
[7] [Dagognet, F., 1984a], pp. 174, 235, 241 et 247.
[8] [Dagognet, F., 1984a], pp. 174-175.

Ces dernières indications peuvent nous mener maintenant au versant constructif de la philosophie de l'image propre à François Dagognet.

- Tout d'abord, revient, comme un *Leitmotiv* et dans toutes ses œuvres, l'idée qu'une image pertinente, qu'elle soit scientifique ou artistique, a toujours pour fonction de condenser ce qu'elle représente. Elle condense, concentre et, en même temps, elle allège, elle rend maniable[1].

- Ce qui nous mène à la seconde caractéristique de l'image pertinente : elle rend maniable parce qu'elle sert à la communication du savoir entre les hommes et donc aussi à son apprentissage[2]. François Dagognet tient donc la communicabilité comme essentielle à l'intelligibilité elle-même.

- L'allègement de la représentation tel qu'il est assuré par la constitution d'une image pertinente améliore également la mémorisation, le stockage d'une information toujours croissante en volume.

- De plus, cette condensation n'étant pas un pur redoublement, elle produit inévitablement des effets de « transfiguration »[3], de « transposition » par quoi elle peut « révéler » le réel plus encore que le dédoubler : « L'être, bloqué sur lui-même et enfoui sous ses propres enveloppes, nous échappe mais il s'agira de le déplier et de l'insérer, coûte que coûte, dans un réseau spatial qui le *révèle* à lui-même, en autorise la surprenante, l'illuminante lecture. »[4]

Or, c'est là que l'on commence à bien percevoir le sens général du combat mené par François Dagognet : en réhabilitant l'image, il s'agit en fait de réhabiliter le rôle de la spatialisation qui peut bien d'ailleurs n'être que temporaire dans l'histoire d'une science, le rôle de l'étalement spatial aux côtés, et non à l'encontre, de l'intellection conceptuelle ou mathématique trop souvent supposée, par ailleurs, ne se projeter sur aucun espace représentatif. Il s'agit de réhabiliter l'espace par rapport aux prérogatives exorbitantes données au temps dans les philosophies des sciences trop exclusivement centrées sur la conceptualisation. Davantage, et parallèlement, il s'agit de poursuivre le combat pour la réhabilitation, voire pour l'exclusive habilitation[5], de l'extériorité contre les privilèges accordés jusqu'à présent à l'intériorité, combat déjà fortement illustré par Wittgenstein en son temps[6] ou bien, dans d'autres approches, par Nietzsche et Freud. Nous n'avons pas à juger de la valeur de ce projet philosophique d'ensemble. Mais ces remarques vont nous conduire à comprendre le sens et la teneur de ce que nous serons bientôt obligé de nommer un iconoclasme résiduel.

Car on ne valorise pas la fonction de condensation et de transfiguration sans dommage pour la fonction de reproduction propre à l'image. On le voit, il demeure, chez François Dagognet, un dédain répété pour le redoublement, pour l'« image pléonastique »[7] au profit de l'« icône » qui resserre, ramasse et finalement devance et « surréalise » ce qu'elle condense dans une fonction heuristique essentielle[8]. « Qui prend tout ne retient rien »[9] précise-t-il. Or, de l'« icône » seule peut

---

[1] Par exemple : [Dagognet, F., 1969, 2002], pp. 6, 90, 97, 193 ; [Dagognet, F., 1973], pp. 11, 48, 56, 63.
[2] [Dagognet, F., 1969, 2002], p. 210 et *passim*.
[3] [Dagognet, F., 1973], p. 43. On notera l'origine et la connotation religieuses de ce terme.
[4] [Dagognet, F., 1973], p. 13. C'est nous qui soulignons.
[5] [Dagognet, F., 1984a], p. 208 : « Rien n'échappera donc à ceux qui recourent à des méthodes comptables et extérioristes. »
[6] Voir [Bouveresse, J., 1974, 1987]. Les derniers travaux de Dagognet en témoignent encore incontestablement : voir [Dagognet, F., 2001], intitulé significativement *Philosophie d'un retournement*.
[7] « [L'organe dans un organisme] n'est surtout pas ce qu'il est : un volume plus ou moins conique, charnu et contractile. Le redoubler n'apprend rien. Et nous n'avons pas cesser d'opposer à l' 'image' pléonastique l' 'icône' abstraite et abréviative », [Dagognet, F., 1973], p. 109.
[8] [Dagognet, F., 1984a], p. 243 : « Dans le domaine scientifique si proche [de l'art du tableau en peinture], la carte réussit la même métamorphose : apparemment réductrice, en vérité heuristique et révélatrice. »
[9] [Dagognet, F., 1973], p. 64.

sortir du plus à partir du moins[1] car une nouvelle représentation est là pour conférer une nouvelle intelligibilité[2] fécondante. C'est précisément la raison pour laquelle l'image comme l'écriture doit être désincarnante, dématérialisante : il lui faut une « immatérialité opératoire »[3]. En ce qui concerne l'écriture par exemple, « il faut justement dématérialiser le premier logos[4], maintenir les énoncés mais ne pas conserver les supports ». Dans ce contexte précis, François Dagognet en vient à expliciter sa vision de la science dans une affirmation assez suggestive et à connotation nettement néo-testamentaire : « La science veut aussi que nous ne possédions le monde qu'à la condition de le perdre ; elle nous oblige à renoncer à son immédiateté. »[5] C'est là que l'influence hégélienne demeure patente et que l'on voit poindre un des présupposés massifs de cette philosophie : le rôle essentiel du langage sous sa forme dialectisante[6], le langage étant supposé présider à l'entreprise de concrétisation de l'idée, inséparable de l'entreprise corrélative de spiritualisation de la matière[7]. À la lecture de la longue profession de foi hégélienne de 1984[8], nous sommes donc fondé à bon droit à soupçonner, là encore, une forme de déplacement conceptuel. Ce qui, chez Hegel, était le « contenu », l'« individuel » ou la « matière », et était supposé nécessaire à la manifestation de l'essence telle que conçue dans le cadre d'une théorie de l'œuvre d'art, devient, chez François Dagognet, le nécessaire moment de l'« extériorité », du déploiement spatial, dans le cadre plus général de toute une théorie fragmentaire, et dispersée-spatialisée à dessein dans son œuvre, de la connaissance par l'image. Cette théorie « dialecticiste » de la connaissance transparaît néanmoins sans grande ambiguïté dans le texte de 1984. Pour la résumer brièvement, indiquons que François Dagognet ne croit pas à l'intuition directe des essences ou des idées : c'est bien au fond ce contre quoi il lutte quand il attaque la métaphysique et la théologie[9]. Par là sont évidemment visés le bergsonisme encore quelque peu en honneur lors de la période de formation de François Dagognet, mais aussi et surtout la phénoménologie toujours et encore vivace dans sa tradition française[10]. Le fait de connaître implique

---

[1] [Dagognet, F., 1973], p. 48.
[2] [Dagognet, F., 1973], p. 13.
[3] [Dagognet, F., 1973], p. 44.
[4] C'est-à-dire les idéogrammes ainsi que les premières écritures encore trop charnues parce que trop phonétisées.
[5] [Dagognet, F., 1973], p. 45.
[6] Car réconciliant « l'idéalisme et le réalisme » : voir [Dagognet, F., 1984a], pp. 161, 163, 243 et 250. Dans le même ordre d'idées, Daniel Parrochia convient pour sa part que l'approche philosophique de Dagognet s'apparente finalement à un « rationalisme dialectique ouvert », *in* [Damien, R., 1998], p. 289.
[7] Sur le rôle essentiel du langage chez Hegel (car fédérant et légitimant toute sa doctrine), nous suivons la lecture lumineuse de Claude Bruaire telle qu'elle est notamment exposée dans son article « Hegel » de l'*Encyclopaedia Universalis*, édition 1989. Bien que nous ne soyons pas spécialiste de Hegel, il nous est apparu que sa fameuse formule (« le réel est rationnel ») doit pouvoir dire deux choses si on la rapporte aux deux sens complémentaires du mot *logos* : le discours, la parole d'une part et, d'autre part, la raison. Cette formule peut signifier d'une part que le réel est dicible, notamment par le biais de notre raison. Autrement dit, le réel nous est intelligible ; c'est l'interprétation le plus souvent seule retenue. D'autre part, cette formule peut vouloir dire que le réel est parlant, qu'il est une parole, qu'il est toujours déjà du langage, et pas seulement une figure de la Raison en marche. Les philosophies que nous proposons de qualifier de « linguisticistes » (Serres, Dagognet et quelques uns de leurs élèves) seraient donc restées essentiellement fidèles à ce second pôle méconnu de l'hégélianisme. Selon nous, la reconnaissance explicite de la thématique christique de la Parole, mêlée à celle de l'incarnation, prend donc ici toute son importance si l'on veut saisir la pensée hégélienne dans ses linéaments, sans pour autant se laisser piéger par elle. Sur les relais de l'iconoclasme occidental présents chez Hegel, on peut lire [Besançon, A, 1994], pp. 277-306. Les philosophies actuelles de « l'information », de la « communication » ou des « réseaux » prolongent donc sur ce point précis une des options ontologiques de Hegel (le linguisticisme) quand bien même elles se défendent d'en prolonger l'optimisme rationaliste à visée totalisante. Par linguisticime, nous entendons désigner toute approche épistémologique qui considère que toute représentation scientifique est de nature linguistique ou peut se ramener à du langage. Le langage ou l'écriture y est alors systématiquement pris comme modèle de toute représentation scientifique, quelle qu'elle soit.
[8] [Dagognet, F., 1984a], pp. 154-157.
[9] [Dagognet, F., 1984a], p. 231.
[10] Michel Serres confirme que, dans les années 1950, à la sortie de l'Ecole Normale, deux « autoroutes » seulement s'offraient aux jeunes philosophes : la phénoménologie ou le marxisme. Voir [Serres, M. et Latour, B., 1992, 1994], p. 18. François Dagognet, en ce qui le concerne, nous paraît avoir opté pour un hégélianisme qu'il a adapté lui-même par un

obligatoirement, pour lui, la médiation d'un acte et d'un langage qui permettent de ramasser, condenser et focaliser le confus, le divers, le bruité. « Le psychisme souffre de la dilution et travaille toujours à réunir »[1] précise-t-il. On comprend pourquoi la naissance des images de synthèse numériques ne lui évoque que l'idée d'un accroissement supplémentaire de notre capacité à comprimer et à traiter des informations. Plus généralement, la sensation est toujours déjà une image condensante, pour lui, et non pas justement une simulation dans le sens précisé précédemment, c'est-à-dire une « image pléonastique ». Comme pour Bachelard, selon François Dagognet, d'abord on sait, ensuite on voit : « on ne voit, en effet, que ce qu'on sait et qu'on attend. »[2] On comprend aussi pourquoi il ne peut pas, à la rigueur, y avoir de redoublement ou de duplication. Toute simulation est une duplication imparfaite qui veut dissimuler son caractère d'image interprétative. À ce titre, elle est toujours trompeuse. Est-on finalement si loin que cela de la critique platonicienne des simulacres ?

Pour en venir à notre objectif principal, nous pensons que c'est dans ce genre de position que se maintient, de façon résiduelle, une forme particulière d'iconoclasme, elle-même assise sur une conception (que nous qualifierons de « dialecticiste »[3]) de la science, notamment telle qu'elle a été assez longuement et communément admise dans la philosophie des sciences française au 20ème siècle. Ainsi, toujours selon ses termes, notre auteur récuse-t-il toute simulation ou représentation triviale de la « facticité » des choses :

« La figuration, ici, n'est pas la doublure de leur état [l'état des pierres et des terres qui ont été représentées par Haüy et Miller] ni la photographie de leur 'en-deçà' - que les rayons X devaient cependant dévoiler et confirmer – mais, davantage, opérationnelle et surtout syntaxique, comme nous y avons insisté, elle tend à focaliser la matière répandue et à la théoriser. Corps idéal, nœud d'interrelations, moyen souverain d'intelligibilité, elle transcrit le dynamisme des qualités et le détache de la facticité, pour l'insérer dans un 'tissu' que la géométrie et l'algèbre assumeront et complèteront. »[4]

On ne compte pas non plus également les passages où François Dagognet, tout en chantant la naissance des technologies photographiques, critique et minimise le rôle et le sens de la photographie comme pure représentation mimétique[5]. C'est pourquoi, selon lui, toute représentation picturale, doit toujours au moins transgresser les « métriques »[6], c'est-à-dire les dimensions relatives originelles.

---

travail considérable de défrichage et de culture de la science en son sein même. Ce qui lui a, entre autres, donné les moyens d'élargir la réflexion sur les représentations scientifiques - qui, jusqu'alors, avaient été trop souvent réduites à la simple unilinéarité du signe - en l'ouvrant à la multidimensionnalité des graphes, des schémas et des réseaux. Voir les actes du colloque qui lui a été consacré [Damien, R., 1998].

[1] [Dagognet, F., 1984a], p. 145.

[2] [Dagognet, F., 1984a], p. 245.

[3] Nous qualifierons de « dialecticisme » cette forme de néo-hégélianisme élargi, adapté à une réflexion sur la réelle diversité des représentations scientifiques. C'est avec Bachelard que cette approche devient dominante dans l'épistémologie française. Mais, comme on le voit, le dialecticisme reste aussi et fondamentalement un cas particulier de linguisticisme.

[4] [Dagognet, F., 1984a], p. 148. C'est nous qui soulignons. Voir aussi [Dagognet, F., 1984a], p. 247 : « Ainsi l'image projective délivre bien le réel de son aspect massif et *dissimulateur* […] » À noter également le ton quelque peu méprisant de [Dagognet, F., 1984a], p. 141 : « On est très éloigné d'un simple reflet ou d'une quelconque *simulation*. » C'est nous qui soulignons.

[5] Voir par exemple [Dagognet, F., 1984a], p. 154 : « nous tenons l'œuvre d'art pour une méta-photographie. »

[6] [Dagognet, F., 1984a], p. 145 : « Comme la suite le confirmera encore, nous donnons au mot 'image' une acception personnelle large : ce qui, assurément, reproduit de quelque manière, mais sans maintenir toutes les qualités de ce qui est répété ; ainsi, elle ne conservera pas les métriques. Toute image rapetisse, et, par là, améliore un ensemble de données mieux soudées » [suit une note sur le microscope et le télescope qui prélèvent et ainsi rendent visible] ; *ibid.*,

C'est donc seulement en tant qu'elle inscrit le réel dans des trames, des tissus, des réseaux représentatifs, discursifs et opératoires que l'image peut être légitimée par la pratique scientifique. François Dagognet réhabilite donc peut-être ici l'image mais en concédant, en quelque sorte, l'essentiel à ses adversaires (notamment les néo-marxistes mais aussi Bachelard, en un sens), puisqu'il se place sur leur propre terrain en véhiculant leur propre hypothèse : la représentation ne peut avoir de fonction que directement discursive ou dialectique mais non pas celle d'une donation en première instance. Plus précisément, il réhabilite l'image certes, mais en ne procédant pour cela qu'à un simple élargissement de la fonction d'abstraction, et en insérant ensuite l'image dans cet élargissement au titre d'une fonction discursive généralisée et pluridimensionnelle. L'image ne vaudrait donc finalement qu'en tant qu'elle déploierait la fonction d'abstraction dans des dimensions graphiques plurielles car spatialisées et plus seulement dans une dimension temporalisée donc unilinéaire comme les mathématiques, ce que les épistémologues antérieurs auraient minoré. L'abstraction est certes pluridimensionnelle, pour François Dagognet. Mais, dans le même geste, en pleine conformité avec une vision hégélienne, il maintient l'image, en tant que modèle discursif purement formel, du seul côté de la connaissance intellective, elle-même supposée par ailleurs être en constant rapport dialectique avec l'être donné.

Dans cette philosophie, on le voit, la simulation informatique ne pourra, par principe, jamais être considérée sur le même plan qu'un donné expérimental car il y est entendu que la nature d'une image reste purement celle d'un discours, d'une langue, d'une écriture, d'une graphie ou d'un système de symboles : elle reste discursive voire linguistique au sens large. Cette philosophie ne permettra aucunement de penser une sorte d'intuition par simulation[1] puisque, de par son anti-kantisme et son anti-intuitivisme résolu et de principe, elle dialectise d'emblée toute forme de sensation, de sensibilité ou de donation. C'est-à-dire qu'elle l'enrôle de force dans le discursif opératoire et condensant. C'est la raison pour laquelle la simulation informatique à visée seulement reproductive, par exemple, restera un non-sens scientifique pour elle, alors même que ce type de simulation intervient pourtant aujourd'hui de plus en plus au titre d'expérimentation virtuelle.

Pour finir, nous voudrions suggérer une interprétation, cette fois-ci psychosociologique et historique, de ce que nous avons caractérisé comme l'iconoclasme résiduel de François Dagognet. Comment se fait-il en effet qu'une philosophie principalement axée sur la réhabilitation de l'image dans notre culture occidentale, à tous les niveaux et dans toutes ses manifestations, échoue finalement à intégrer correctement en elle une épistémologie de la simulation scientifique ? L'interprétation que nous proposerons ici nous paraît d'autant plus convaincante, on le verra, qu'elle peut aussi valoir pour l'iconoclasme du premier Michel Serres, comme pour celui (plus subtil, parce que plus précis conceptuellement, et mieux informé des productions de la science contemporaine) des premiers travaux de Gilles-Gaston Granger, travaux que nous évoquerons dans la suite. Cette explication pourra donc valoir à l'échelle de ce que nous pourrions appeler un « esprit du temps » épistémologique de l'après-guerre. Dans le cas particulier de François

242 : « L'important, pour nous, vient de ce que les aspects connus et surtout les propriétés métriques ont été abandonnées […] » ; *ibid*., p. 249 : « Dagron et la guerre, Gros et l'archéologie, on saisit l'importance des 'reproductions' fidèles, bien que non-métriques. »

[1] Telle qu'elle est possible aujourd'hui avec la modélisation fractionnée et la simulation pluriformalisée à valeur d'expérimentation. Voir les premiers travaux de Philippe de Reffye et ceux de Jean Dauzat. En ce sens, la simulation informatique pluriformalisée nous semble bien mettre en œuvre une sorte de pensée « figurale » (Lyotard) ou « visuelle » (Didi-Hubermann), qui ne conserve plus rien de *sémiotique*, de *linguistique* ou d'icono*graphique*. Voir [Varenne, F., 2003b]. Dire cela n'est pas promettre pour autant on ne sait quelle rencontre mystique ni hypothétique contemplation ou donation de la chose en soi en « chair et en os », par le biais de la simulation. Les habituels boucliers de l'anti-idolâtrie ne devraient donc pas trop prestement se dresser devant cette nouvelle méthode scientifique.

Dagognet, il nous paraît en effet symptomatique de constater combien cet auteur néglige le plus souvent l'origine théologique et judéo-chrétienne de l'interdit de l'image pour ne le voir naître que dans la philosophie, spécialement la philosophie grecque[1]. Nous pensons qu'il s'agit là d'un *lapsus* qui mérite un essai d'interprétation. Réfléchissant sur la crise de la représentation que la culture occidentale a connu au tournant du 19ème et du 20ème siècle et revenant sur les termes hébraïques que le grec *eidolon* a traduits, le philosophe Jean-Luc Nancy rappelle pourtant que l'iconoclasme biblique n'est pas du tout un refus de la copie, de l'image ou de l'imitation. Il ne s'agit pas là essentiellement de refouler l'effroi ressenti devant son propre redoublement. Cet iconoclasme vise plus précisément l'interdiction d'une production qui soit la reproduction, donc la maîtrise, d'une présence. Il peut y avoir des images mais pas de sculptures, telles que le veau d'or par exemple, qui, par leur tridimensionnalité concrète, objectale et donc simulante, jetteraient le trouble et donneraient la fausse impression d'une présence réelle du divin. Or, et c'est là le point central de cet iconoclasme : il ne revient pas aux hommes de se rendre Dieu présent. Il s'agit donc clairement ici « du motif d'un Dieu qui ne s'en prend nullement à l'image, mais qui ne donne sa vérité que dans le retrait de sa présence »[2]. Dieu n'a donc de sens que sur le fond de son absence au monde puisque sa création ne s'est manifestée que par son départ d'elle. Se livrer à la production d'une image qui donnerait l'illusion d'une présence, voilà donc ce qui est sacrilège. En revanche toute représentation qui indique respectueusement en elle-même qu'elle ne nous présente pas ce qu'elle nous représente, qui laisse donc pressentir que quelque chose de la chose représentée y demeure absent, toute représentation de ce type, telle l'icône avec son iconographie[3], sera considérée comme acceptable. Fidèle à la tradition biblique, comme Hegel du reste, c'est bien encore ce genre de représentation seul qu'autorise François Dagognet en imposant qu'elle soit toujours transfigurante, condensante mais surtout pas redoublante[4].

En conséquence, nous croyons que les arguments actuels qui marginalisent ou rejettent plus ou moins le recours à la pure et simple simulation manifestent le refoulement d'un deuil, inaccompli quant à lui, de cet iconoclasme biblique. En ne réglant son compte qu'à celui que l'on préfère hisser au rang de seul adversaire, on s'autorise à éluder l'autre iconoclasme qui reste

---

[1] Voir [Dagognet, F., 1984], chapitre I.

[2] [Nancy, J.-L., 2001], p. 18.

[3] Il est à noter qu'un des livres de François Dagognet qui réhabilite l'image s'intitule précisément *Ecriture et iconographie* (1973). C'est-à-dire que le terme d'écriture y est employé deux fois, la deuxième fois pour désigner la représentation entendue comme toujours essentiellement « graphique », c'est-à-dire scripturaire.

[4] Jean-Luc Nancy rappelle que la crise de la représentation a précisément atteint son comble dans la *Weltanschauung* nazie, et avant tout nommément dans celle de Hitler dont il cite abondamment le livre *Mein Kampf*. Il montre que le nazisme, en tant que production idéologique, avait et était essentiellement une conception claire, calculée et délirante de la représentation sans reste, spécifiquement de la représentation achevée de l'humanité à elle-même, brisant par-là le pacte iconoclaste d'origine biblique qui visait à récuser toute représentation voulant passer pour une présence authentique : « Le corps aryen est une idée identique à une présence, ou la présence sans reste d'une idée : assez exactement ce que l'Occident avait depuis des siècles pensé comme l'idole. » Plus loin, Jean-Luc Nancy nous permet de comprendre, dans cette perspective, les raisons pour lesquelles les nazis se livrèrent à de multiples parades, inséparables de l'ordre qu'ils instaurèrent : il y perçoit justement le signe d'une « présence totale et saturée, cette réplétion ou cet assouvissement de présence », *ibid.*, p. 25. L'ordre nazi commande donc une sorte de « surreprésentation » qui oblitère dans une pure présence, y compris de la mort même infligée en masse et regardée froidement en face, l'économie biblique de l'icône. Sans que l'on prétende aucunement voir là une explication unique ou définitive de ce cataclysme humain, on conçoit néanmoins que les sciences humaines que sont les épistémologies – étant sciences des productions intellectuelles humaines – aient mis tant de temps à se remettre – si même elles s'en sont aujourd'hui remises - de cette surexposition de la présence dans la culture occidentale. Sur ce point, nous pensons que les analyses de Régis Debray ne vont pas assez loin, voire sont excessivement nivelantes, au regard de l'histoire. Elles tendent, elles-aussi, à évacuer une réflexion en profondeur sur le statut de l'image en Occident après Auschwitz. Cela tient sans doute au fait que son propos n'est délibérément pas historique : « Le médiologue n'a pas les mêmes critères que l'historien », [Debray, R., 1992], p. 306. Quoi qu'il en soit, au vu de ce que nous avons rappelé de l'iconoclasme biblique, il nous paraît fortement contestable de considérer que, de la naissance de l'écriture à celle de l'imprimerie, les hommes aient vécu sous le régime de l'« idole », *ibid.*, pp. 292-293.

encore actif de façon latente dans la culture épistémologique. Ainsi, pour cette culture, l'image scientifique doit être transfigurante pour que l'on ne croit surtout pas à une présence du réel dans le virtuel. L'angoisse devant notre actuelle maîtrise (rendue possible par la maîtrise du virtuel) de la présence des choses en « chair et en os » est plus grande, plus secrètement active et mieux refoulée encore que celle qui nous gagne devant leur simple recopie. Nous renvoyons sur ce point précis à l'analyse que nous ferons ci-dessous des travaux de Philippe Quéau. Pour l'épistémologie contemporaine, la simulation réaliste, celle qui peut se faire passer pour le réel, resterait donc un interdit inconscient, mais rationalisé *a posteriori,* soit sous la forme d'une impossibilité logique (avec l'argument du *Cratyle*), soit sous l'accusation de trivialité, d'inutilité, de vulgarité ou de non-sens : ainsi en est-il pour Suzanne Bachelard ou François Dagognet. Un tel déni empêche ces épistémologies de concevoir le rôle que les simulations peuvent jouer actuellement en tant que véritables expériences d'un nouveau type[1].

Gilles-Gaston Granger : des « styles » au « virtuel »

Gilles-Gaston Granger a produit un travail d'épistémologie économique qui a fait date et reste encore influent aujourd'hui. À la fin des années 1950, et dans la suite immédiate de ses réflexions sur la « Méthodologie économique » qui avaient fait l'objet de sa thèse, il se présente comme désireux de produire une épistémologie comparative des sciences en général, et cela avant tout pour servir à la question de l'axiomatisation et de la formalisation en sciences humaines. C'est d'abord son ouvrage de 1960, *Pensée formelle et sciences de l'homme*, qui va nous intéresser ici puisque la question de la modélisation y est maintes fois abordée. Tout au long de ce livre, Gilles-Gaston Granger tient à montrer que les diverses approches contemporaines du fait humain, qu'elles soient phénoménologiques ou herméneutiques d'une part, formalistes, nominalistes, ou néo-positivistes d'autre part, ne peuvent conduire à des sciences humaines effectives. C'est à partir d'exemples exposés en détail et tirés de la linguistique, de l'économie, de la recherche opérationnelle, de la psychosociologie et de la sociologie, qu'il analyse les constructions conceptuelles spécifiques aux sciences humaines. C'est à cette seule condition qu'on peut concevoir le véritable travail de conceptualisation et de formalisation auquel elles se livrent. Pour disqualifier les herméneutes, il fait ainsi valoir les arguments critiques de Cavaillès contre une philosophie de la conscience qui voudrait se faire passer pour une épistémologie. Contre les formalistes, contre le premier Wittgenstein et les néo-positivistes anglo-saxons notamment, il rappelle qu'il est caricatural de « réduire la science à un langage »[2] parce que l'on s'interdit par là de comprendre comment on peut avoir une prise sur les choses. Il préfère penser que toute science *appartient à* un langage puisque précisément elle résulte d'un effort proprement humain de médiation des expériences immédiates que nous avons des choses par le moyen du langage. Ainsi notre auteur est l'un des rares épistémologues de son époque à préciser véritablement le rapport qu'il veut voir à l'œuvre entre science et langage. Toujours est-il que cet argument, encore éminemment linguisticiste, de la médiation obligée, est en même temps celui qui lui permet de récuser tout autant le recours aux données sensibles et aux vécus immédiats dans la constitution d'une science humaine : « la science appréhende des objets en construisant des

[1] Ces remarques nous confirment dans l'idée qu'il serait sans doute temps, aujourd'hui, de prolonger le travail de Bachelard par une *psychanalyse de la connaissance épistémologique*, et pas seulement par une sempiternelle chasse aux idéologies (idéologies idéalistes, de la communication, des réseaux, etc.) qui ne fait que retomber toujours dans un piège qu'elle croit pourtant avoir perçu. D'où l'on voit aussi l'importance d'une histoire compréhensive, psychologique, et pas seulement sociale, des productions intellectuelles et techniques.
[2] [Granger, G.-G., 1960, 1967], p. 13.

systèmes de formes *dans un langage*, et non pas directement sur des données sensibles. »[1] Suivent alors de nombreux passages où notre auteur tient à dénier tout recours à l'intuition sensible ou à la compréhension en sciences humaines[2]. Son attitude linguisticiste est ainsi clairement rapportée à un anti-intuitivisme anti-kantien d'origine hégélienne : la science commence par la négation de l'immédiateté. Néanmoins, comme nous le verrons, notre auteur doit conserver une place au « transcendantal » dans sa théorie de la science, même s'il refuse d'en revenir au sujet kantien. L'objet de son étude, la formalisation, lui commande en effet d'expliquer comment et à quelles fins on peut diversement formaliser dans les trois grands champs respectifs de la science : mathématiques, sciences de la nature et sciences de l'homme.

Par la suite, et en s'aidant d'exemples, notre auteur montre que tout l'enjeu d'une objectivation et d'une formalisation réussies en sciences humaines repose justement sur une émancipation radicale à l'égard du vécu humain. Il s'inscrit donc en faux par rapport à toute science humaine qui se voudrait d'emblée compréhensive puisqu'il récuse toute constitution directe d'un discours scientifique à partir des vécus humains. En linguistique, par exemple, on ne parvient à modéliser que si l'on se libère des découpages tels qu'ils nous apparaissent ordinairement et avec évidence dans notre usage quotidien de la langue. Le principal obstacle que rencontre l'objectivation en sciences humaines tient, selon lui, aux résidus d'affectivité et d'intuition que l'on laisse dans les découpages naïfs des phénomènes. C'est pourquoi le modèle, de nature langagière, sert à « se libérer des vécus humains »[3]. Le modèle sert ainsi d'« unité technique »[4] intégrée sur laquelle et par laquelle on peut concevoir des interventions empiriques mieux informées au sujet des faits humains. Paradoxalement, mais de façon compréhensible, le formel est donc ce qui permet l'application[5]. Il n'est pas une image. Il est un discours à objectif pratique. Les objets formels des sciences humaines sont en effet conçus comme des « systèmes d'intervention », des « ensembles de contrôle »[6]. Comme cette interprétation du modèle dans les sciences en général ne le caractérise pas comme une représentation de plein droit, Gilles-Gaston Granger peut en déduire que la formalisation ou la modélisation du fait humain n'aura pas pour conséquence d'écraser les hommes en les représentant sous la forme d'être mécaniques[7]. Cet argument lui permet de rejeter comme infondée une de nos craintes contemporaines en ce domaine : le recours aux modèles ne commande pas systématiquement toute une vision métaphysique réductrice et totalitaire de l'homme.

Mais comment s'émanciper des vécus de conscience pour aboutir à une formalisation véritablement scientifique de l'humain ? Au vu des réussites de la linguistique formelle non intuitive, de la recherche opérationnelle et de la macroéconomie, notre auteur se convainc qu'il faut approcher le fait humain avec un « point de vue global »[8]. Ensuite seulement, on est autorisé à analyser les divers comportements de ces phénomènes globaux. C'est bien le grand

---

[1] [Granger, G.-G., 1960, 1967], p. 13.
[2] Par là sont bien évidemment visées les écoles allemandes de sociologie compréhensive - Dilthey, Weber, Simmel -, remises pourtant à l'ordre du jour, à la même époque, par Raymond Aron. Il n'est pas indifférent, comme on l'a déjà vu avec notre remarque précédente sur Louis de Broglie, que la conception formaliste et linguisticiste des modèles propre à Granger refuse précisément toute tentative de « compréhension » en science humaine. En effet, c'est pour lui une évidence implicite et qui ne fait plus débat, que la nécessité de la compréhension soit justement déjà neutralisée dans les derniers développements des sciences de la nature, spécialement en physique. Or elles constituent indéniablement une sorte de modèle, à infléchir certes, mais à suivre. L'influence bachelardienne sur ce point précis est patente.
[3] [Granger, G.-G., 1960, 1967], p. 104.
[4] [Granger, G.-G., 1960, 1967], p. 100.
[5] [Granger, G.-G., 1960, 1967], p. 91.
[6] [Granger, G.-G., 1960, 1967], p. 101.
[7] [Granger, G.-G., 1960, 1967], p. 104.
[8] [Granger, G.-G., 1960, 1967], p. 100.

enseignement qu'il veut voir à l'œuvre dans l'essor des méthodes d'analyse factorielle et d'analyse en composantes principales. Elles permettent de faire émerger, à partir des données, tout un système abstrait, donc non-intuitif, et sous-jacent. Ainsi en est-il spécialement de l'analyse factorielle en psychologie. Elle permet au psychologue de ne pas préjuger de la structuration sous-jacente des différents types de comportement, mais, au contraire, elle la fait apparaître après les mesures, grâce à l'analyse statistique. Il y a ainsi un moyen d'objectiver la qualité, chose que beaucoup considèrent comme impossible aux sciences humaines. Or, notre auteur montre aussi par là que la mathématisation ne se réduit pas à la quantification. Il faut comprendre que la science est une recherche de structures interprétées comme autant de systèmes de signes, ces signes valant d'abord par leurs seules différences mutuelles et ensuite par les opérations qu'ils autorisent. Cette dialectique de la qualité perçue à échelle globale permet de construire progressivement des systèmes de différences purement formelles menant à leur tour à des arborescences ou même à des calculs. Notons qu'en ce qui concerne l'interprétation du système de signe comme jeu des différences indifférentes, ce n'est pas, significativement, la leçon de Saussure que Gilles-Gaston Granger retient ici, mais bien, encore une fois, celle de Hegel, il est vrai, rectifiée.

Ces réflexions le conduisent tout naturellement à concevoir la modélisation comme d'abord descriptive ou « positiviste » avant d'être théorique. On recueille des données à une échelle idoine, échelle que l'on découvre par tâtonnements. Et ces données, moyennant un travail que l'on effectue sur elles, doivent permettrent de construire un modèle mathématique. Ainsi le modèle est toujours le résultat d'une analyse de données qui a modifié, « transmuté », selon le terme de notre auteur, la nature des données premières afin de nous les rendre neutres[1]. Ces données modifiées deviennent à leur tour susceptibles de rentrer dans la structuration formelle objective que l'on se propose, le modèle. Le modèle en sciences humaines passe donc pour une proposition d'explication, neutralisée et formalisée à une certaine échelle, de certains faits humains. Ainsi il devient inattaquable par les idéologies, ou par le vécu intuitif ou émotif immédiat des hommes. Le sens ne disparaît pas dans ce traitement par modèles du fait humain, mais il est transmuté et il se donne d'un nouveau point de vue, plus objectif et opératoire. On n'y vide donc pas l'humain de son sens. Mais il est vrai que l'ordre habituel du sens y est supprimé. Ainsi notre auteur écrit-il :

« Le savant, qui vise à construire des modèles du phénomène ne saurait donc confondre cet ordre du sens [habituel] avec l'ordre du schéma abstrait qu'il prétend établir. Il faudrait renverser ici la phrase de M. Merleau-Ponty qui définit le propos du phénoménologue : 'Il s'agit de décrire, et non pas d'expliquer et d'analyser' ; il s'agit au contraire ici d'expliquer et d'analyser, et non pas de décrire, si décrire c'est comprendre des significations. Cette réduction opérée, le fait humain devient objet de science ; non pas qu'il se trouve ramené aux simples dimensions de la chose, mais son épaisseur de signification elle-même se trouve, autant qu'il se peut, conservée, neutralisée, objectivée enfin. »[2]

Il est donc essentiel que le modèle ne ressemble aucunement au fait humain tel qu'on en prend connaissance dans notre vie et tel qu'il est valorisé par la phénoménologie contemporaine. Voilà donc l'iconoclasme auquel le mène sa conception linguisticiste de la construction de la science. Le modèle vaut en ce qu'il transfigure l'expérience immédiate. Il ne doit aucunement reproduire ni même seulement décrire le fait humain. Il est essentiel à la constitution de véritables

[1] C'est donc le déracinement occasionné par la modélisation statistique qui permet la neutralité.
[2] [Granger, G.-G., 1960, 1967], p. 131.

sciences humaines, car il est justement le fruit d'une analyse qui neutralise le sens humain premier. On conçoit alors combien cette interprétation du modèle en sciences humaines interdit par avance la conception de simulations informatiques photo-réalistes et spatialisées telles que celles qui apparaîtront au début des années 1990 en géographie. On pourrait cependant faire crédit à notre auteur du fait qu'il s'est surtout intéressé à la linguistique et à l'économie, sciences qui portent donc à l'époque essentiellement sur des discours ou sur des échanges de symboles ou de marchandises, c'est-à-dire sur des communications de signes ou de matières, phénomènes « abstraits » car *a priori* peu spatialisés. Mais notre auteur se rend fautif selon nous lorsque, sous l'influence de la théorie de la communication de Shannon, celle de l'information de Brillouin et la cybernétique de Wiener[1], il s'autorise à généraliser les résultats précédents aux autres sciences humaines. Cela est perceptible lorsqu'il affirme que tous les modèles en sciences humaines ne peuvent être que de deux sortes : énergétiques ou cybernétiques[2], les uns s'occupant des flux d'énergies, les autres des flux d'informations.

Pour terminer sur cette œuvre, nous voudrions indiquer un passage qui nous semble témoigner en creux d'un malaise profond et persistant à l'égard de la prise en considération de l'affectivité humaine et du vécu significatif des hommes telle qu'elle devrait intervenir pourtant dans les sciences humaines. La page d'où elles sont extraites tranche dans toute l'œuvre parce que cette dernière conserve en général une grande neutralité dans le ton et une certaine austérité dans l'expression. Les termes employés peuvent servir à nous faire comprendre combien la soif de formalisme trouvait alors sa motivation dans des ressorts cachés de la conscience épistémologique :

« S'il faut demander aux mathématiques les exemples les plus parfaits de pensée conceptuelle triomphante, pour obtenir des échantillons de pensée conceptuelle militante et souffrante[3], c'est aux sciences de l'homme qu'il faut d'abord s'adresser. Dans le domaine mathématique, les notions sont spontanément traitées – sinon pensées – comme complexes structuraux, que l'axiomatisation révèle dans une sorte d'apothéose. C'est l'univers de la Grâce. Le domaine du fait humain, scientifiquement parlant, c'est l'univers du Péché ; il y faut une volonté d'axiomatisation consciente pour mettre à nu le concept. »[4]

Les notions théologiques (« révèle », « souffrante », « apothéose », « Grâce », « Péché ») mais aussi charnelles (« à nu ») qui interviennent ici sont les uniques occurrences de ces lexiques dans le texte. Mais par la suite, Gilles-Gaston Granger explicite quand même ce qu'il vise ici énigmatiquement derrière le terme de Péché[5] : c'est l'idéalisme philosophique et épistémologique qui commet le Péché de croire que dans la conscience peut se manifester, directement et sans médiation, la présence d'une essence[6]. Cette centration sur l'Ego, cette fusion entre la conscience et la présence, voilà ce qui insupporte Gilles-Gaston Granger ; à tel point qu'il ne cesse de revenir sur la nécessaire négation de toute intuition[7].

---

[1] Tous ces auteurs ont également fortement impressionné Michel Serres et François Dagognet comme on l'a vu.
[2] [Granger, G.-G., 1960, 1967], p. 146.
[3] Granger fait bien sûr ici allusion au travail qu'exige la conceptualisation et qui la distingue totalement d'une pure contemplation.
[4] [Granger, G.-G., 1960, 1967], p. 179.
[5] [Granger, G.-G., 1960, 1967], p. 180.
[6] Voir *infra* notre analyse de la crise de la représentation et son rapport avec le nazisme.
[7] Voir [Granger, G.-G., 1960, 1967], pp. 12, 13, 63, par exemple. Voir aussi la page 143 : « [La médiation scientifique] tourne le dos à la saisie directe des significations qui oriente le plus souvent la pratique quotidienne empirique, mais

On reconnaît là un argument semblable à ceux qu'emploie François Dagognet contre les phénoménologues et les mystiques. Le Péché est à discerner dans cette espèce d'auto-érotisme que pratique coupablement la conscience connaissante voulant reconnaître une présence en elle et s'identifier à elle dans le même mouvement pervers. L'intuition est pécheresse ; et c'est à ce titre qu'il faut la condamner, pour Gilles-Gaston Granger. Mais comment s'expliquer la force affective et quelque peu échevelée de ce passage ? Selon nous, la préférence instinctive et quasi-générale pour le retour à une interprétation de toute connaissance comme médiation *via* le langage, dans l'épistémologie française de l'après-guerre, vaudrait comme un châtiment, comme une expiation (qu'elle prend inconsciemment en charge en vue d'une rédemption), que la culture de l'époque s'inflige *volens nolens,* face à l'état d'idéalisme et d'idolâtrie du présent et du passé récent de nos sociétés[1]. C'est sur ce point précisément que l'iconoclasme biblique, et non hellénique, est restauré et fait encore écho dans cette œuvre épistémologique qui glorifie la forme et les structures, en sauvant le fond par la fuite en avant de la *praxis*[2]. Voici encore comment, dans cette même page, notre auteur résume le rôle de l'axiomatisation en sciences humaines :

« L'essai d'axiomatisation est alors tâtonnement préalable, la préparation nécessaire d'un champ opératoire par une asepsie[3] *drastique, et certainement agressive, des notions communes. »*[4]

Ainsi, avec la nouvelle méthode de la modélisation formelle, les sciences humaines ne peuvent (ne doivent ?) pas se priver d'une certaine agressivité à l'égard des faits humains et de

---

c'est pour préparer un modèle des phénomènes qui charpentera plus efficacement une pratique concertée, organisée, rationnelle. »

[1] Rappelons ici pour mémoire le contenu du passage où Freud résume ses principales réflexions sur le fonctionnement du tabou dans les « peuples primitifs » : « Le tabou est une prohibition très ancienne, imposée du dehors – par une autorité – et dirigée contre les désirs les plus intenses de l'homme. La tendance à la transgresser persiste dans son inconscient ; les hommes qui obéissent au tabou sont ambivalents à l'égard de ce qui est tabou. La force magique, attribuée au tabou, se réduit au pouvoir qu'il possède d'induire l'homme en tentation ; elle se comporte comme une contagion, parce que l'exemple est toujours contagieux et que le désir défendu se déplace dans l'inconscient sur un autre objet [voir notre analyse précédente des déplacements conceptuels en épistémologie]. L'expiation de la violation d'un tabou par une renonciation [dans notre cas : se/ce « couper » du vécu humain] prouve que c'est une renonciation qui est à la base du tabou », [Freud, S., 1913, 1965, 1979], pp. 46-47.

[2] Si l'on veut encore se persuader que ce genre de *lapsus* peut apparaître, même dans les propos d'un épistémologue, on peut se référer à la page 90 de cet ouvrage où apparaissent ensemble les notions de « découpage » - dans le vif pourrait-on dire - du fait humain, découpage nécessaire à toute formalisation – et dont l'agressivité sera assumée explicitement page 179, voir *infra* - et celle de « coupure » - bien avant le *lapsus* althussérien du même nom, déplaçant le concept bachelardien de « rupture », et qui désignera lui aussi la découpe d'une culture : « Le *visible speech* [technique de visualisation automatique de la parole après analyse phonologique], au contraire, en introduisant audacieusement la machine comme moyen de transcription, coupe l'objet linguistique des significations vécues. En le dépaysant radicalement, pour ainsi dire, il confère à son caractère structural l'autonomie qu'exige une véritable objectivation », *ibid*., pp. 90-91. Voir aussi [Granger, G.-G., 1968], p. 169 : « Une coupure est cependant apparue à la plupart des linguistes entre l'organisation syntaxique et l'organisation sémantique. » Enfin, sur la cure psychanalytique comme « coupure » significative dans le discours qu'est l'inconscient, voir les travaux antérieurs (1948) de Jacques Lacan, notamment dans les Ecrits, Tome I : « L'agressivité en psychanalyse », pp. 100-123, plus particulièrement, ce passage explicite et très lucide – écrit donc trois ans après la fin de la guerre -, p. 122 : « […] la guerre, après nous avoir appris beaucoup sur l'origine des névroses, se montre peut-être trop exigeante en fait de sujets toujours plus neutres dans une agressivité dont le pathétique est indésirable. » De par sa position de clinicien, Lacan était sans doute le plus lucide : il avait senti que ce lexique de la « coupure » était révélateur d'une pulsion d'autocastration propre à la culture occidentale de son temps.

[3] Notons ici le choix de termes imagés, très durs en effet, puisque, dans le contexte médical auquel il est fait allusion, l'asepsie désigne toute forme de stérilisation, d'éradication d'agents infectieux.

[4] [Granger, G.-G., 1960, 1967], p. 179. Dans sa préface à la seconde édition de 1967, afin d'affermir sa perspective formaliste, notre auteur rappelle explicitement que l'on doit désormais considérer tout fait humain comme une « machine fonctionnelle » (*ibid*., p. 162), pourvue de structurations symboliques ou énergétiques diversement emboîtées et pas toujours réductibles les unes aux autres.

l'humanité dans son ensemble dès lors qu'elle persiste à demeurer dans la maladie de l'idolâtrie, phénomène humain dont on sait bien depuis la dernière guerre à quoi il peut mener.

Par la suite, Gilles-Gaston Granger poursuit son enquête dans la direction de la *praxis* des formalismes. Dans *Essai d'une philosophie du style*, il procède ainsi à l'exposé analytique de trois différents styles mathématiques. Un « style » avait été défini, dans l'ouvrage de 1960, comme un dosage particulier entre langage formalisé et langue usuelle dans la construction d'un savoir scientifique. En effet, il ne fait pas de doute pour Gilles-Gaston Granger que l'on ne pourra jamais réduire totalement la présence de la langue usuelle dans la pensée scientifique, y compris dans les sciences les plus abstraites. La formalisation totale y est plus un idéal régulateur qu'une règle constitutive. Cette nécessaire collaboration[1] entre les deux langages est donc bien un caractère proprement transcendantal de la pensée scientifique[2], en un sens assez différent de celui de Kant cependant, puisqu'il fait place, par principe, à l'articulation évolutive et historiquement conditionnée des formes et des pratiques dans la science. De plus, l'intuition y a été liquidée et elle a été remplacée par l'hétérogénéité fécondante et dynamique des langages entre eux, langages censés manifester la pensée scientifique en acte[3]. Dès 1960 donc, et bien avant l'actuelle sociologie des sciences, Gilles-Gaston Granger comprend le recours aux modèles mathématiques comme justiciable d'une pragmatique des styles formels, ce terme étant pris en un sens assez voisin de la pragmatique des linguistes[4] qu'il n'ignorait pas. Les questions épistémologiques deviennent donc des problèmes intra-linguistiques, au sens, il est vrai d'une analyse linguistique élargie. C'est ce qui se confirme nettement à la lecture du livre de 1968 sur le style. L'approche exclusive de la pensée scientifique par la pragmatique et le travail permet ainsi à notre auteur de régler le vieux problème de la science de l'individuel, problème remontant dans sa formulation précise à Aristote.

---

[1] Granger appelle aussi ce phénomène discursif une « langue mixte » : [Granger, G.-G., 1960, 1967], p. 43. Voici comment il justifie son omniprésence dans toutes les sciences : « C'est par son moyen [le moyen de la langue vernaculaire ou usuelle] que sont décrites intuitivement les expériences, que sont indiquées les règles d'emploi des symbolismes, et d'une manière plus précise même, que sont exposés les mouvements d'une syntaxe logique permettant l'enchaînement des segments du langage formel », *ibid.*, p. 43. Il est significatif que, sur ce point, notre auteur ait recours à un argument finalement très proche de celui des néo-positivistes qui lui sont contemporains - Hempel et Nagel –, notamment lorsque ces derniers légitiment la nécessaire existence des règles de correspondances entre expérimentations et concepts théoriques. Voir [Nagel, 1960, 1979], pp. 97-105. Simplement notre auteur choisit ici pour sa part de rapporter cette nécessité à une essentielle *praxis* propre à la pensée scientifique et qui lui serait constitutive en tant que construction de langages. C'est pourquoi, dans cette perspective linguisticiste – ouverte à la « pragmatique » de la langue, terme employé p. 43 -, il va par la suite axer l'analyse de cette *praxis* sur l'analyse des divers styles linguistiques des sciences.

[2] [Granger, G.-G., 1968], p. 44.

[3] Voir par exemple [Granger, G.-G., 1968], p. 113 : « On pourrait à cet égard […] dire que l'activité linguistique sous tous ses aspects se substitue dans cette épistémologie à la *perception* kantienne. »

[4] « Sont 'pragmatiques' les traits qui donnent à un fragment linguistique une fonction dans un acte ou un jeu de communication », selon la définition de Francis Jacques publiée dans l'article « pragmatique » de *l'Encyclopaedia Universalis*, édition 1989 sur CD-Rom, 1995. Ainsi, dans le même article, il commente : « la philosophie des sciences reconnaît de plus en plus nettement que les concepts tels que 'soutenir une théorie', 'considérer un énoncé comme une loi', 'utiliser un argument à l'égard de quelqu'un pour expliquer un fait' sont des relations pragmatiques. » On voit alors immédiatement où peut se trouver une confusion majeure, actuellement encore fortement entretenue en sociologie des sciences, entre la *praxis* philosophique et la pragmatique linguistique appliquée à l'épistémologie. Les choses qui font, en science, l'objet d'expérimentations, sont-elles des faits de langage ? Les choses parlent-elles d'elles-mêmes ? Les productions de faits sont-elles toujours réductibles à des productions rhétoriques ? Il nous semble que c'est encore l'un des présupposés implicites majeurs et inaperçus de la philosophie des sciences contemporaines, depuis le premier Michel Serres jusqu'au programme fort de la sociologie des sciences. Si l'on reste en effet inconsciemment dans cette perspective linguisticiste – comme c'est toujours le cas de ces philosophies -, on fera allègrement la confusion entre la *praxis,* au sens marxiste de travail de communication-action avec et sur les hommes compris comme êtres de langages, et la pragmatique scientifique comme communication-dialogue-dialectique avec les objets de science, puisque ces objets de sciences sont toujours déjà des êtres langagiers : ils sont *du* langage, ils nous « parlent » donc en un sens puisqu'ils sont toujours le fruit d'une médiation de la conscience, au sens de Hegel, ou de Marx si l'on préfère. En 1968, même s'il s'en défend - op. cit., p. 4 -, il n'a pas encore véritablement échappé aux confusions du « panglotisme » de l'analyse structurale - selon son propre terme -, du fait même de son linguisticisme de principe.

Reprenant une indication rapide d'Aristote sur l'acte de perception, Gilles-Gaston Granger part du principe que c'est seulement dans l'acte d'intervention sur l'individu que la science peut être considérée comme visant aussi l'individuel. Il n'y a donc pas de science spéculative de l'individuel certes, mais il y a bien une pensée scientifique stylisée qui s'adresse à l'individuel en *opérant* sur lui ; et c'est la seule science qui soit légitime. Il faut pour cela considérer que les scientifiques sont des acteurs et non pas de simples récepteurs de signes[1]. Si l'on veut donc penser une science de l'individuel, ce qui est, selon Gilles-Gaston Granger, particulièrement nécessaire au fondement d'une science humaine rigoureuse, il faut la rapporter à sa pragmatique circonstancielle, à sa pratique dans laquelle s'exprime un style précisément individué lui-même et inimitable malgré les formalismes qui y interviennent. Par la suite, lorsque Gilles-Gaston Granger se trouve face à la difficulté du caractère apparemment bien peu pragmatique des langages formalisés (puisqu'étant devenus très complexes, ils ne peuvent pas véritablement servir comme moyens de communication), il ne renonce pourtant pas à son principe linguisticiste et répond que l'important, pour ces langages, est de montrer la simple *possibilité* de leur utilisation au titre de moyens de communication. Et une note en bas de page ajoute que cette virtualité ne devient réalité qu'avec les machines programmables. C'est donc là qu'il fait intervenir la notion de virtuel qu'il thématisera bien plus tard[2] : « Etrange langage, dont la fonction communicative n'est le plus souvent que virtuelle, et dont la présence est celle d'une ombre, ou si l'on préfère, d'une divinité. »[3] L'iconoclasme biblique est donc bien sauf, encore une fois, dans cette épistémologie, puisque la divinité (mathématique, mais ici le choix des mots fait *lapsus*, une fois de plus) y est respectée dans la représentation même de son absence. Le caractère d'« expiation » propre au moment visant à neutraliser le vécu à l'aide des formalismes devient, dans cet ouvrage, de plus en plus explicite. Après avoir rappelé que l'approche formelle en sciences humaines commande que l'on ne considère d'abord de l'action humaine que ses effets, il convient qu'une « politique aussi brutale » ne se justifie que par la promesse d'une réconciliation à terme entre le concret et le rationnel. Le ton devient alors franchement hégélien si ce n'est prophétique :

« Mais si l'on veut que cette saisie [du fait humain] s'intègre à une connaissance scientifique, et devienne autre chose qu'une modification fugace et illusoire de l'expérience d'un Ego, devienne un savoir historique, concret mais rationnel[4], une phase de renoncement provisoire est nécessaire.

---

[1] [Granger, G.-G., 1968], p. 15. Notre auteur définit alors son approche comme un pas en « direction d'une étude concrète des œuvres », *ibid.*, p. 16, « le style [permettant] de penser les rapports de la théorie et de la pratique », *ibid.*, p. 16.

[2] Voir [Granger, G.-G., 1995], p. 231 : « Ce que nous appelons le *virtuel* dans la démarche scientifique est une figure – une représentation – des choses et des faits détachée des conditions d'une expérience complète, c'est-à-dire d'une saisie individuée, singulière, vécue comme présente. » Il faut noter – comme cela est perceptible ici -que dans les textes les plus récents de notre auteur, le linguisticisme des premières années a totalement disparu et que la notion de « représentation » y est préférée à celle de « langage » ou de « structure ». La science devient ainsi une « ontologie *virtuelle* », *ibid.*, p. 234. Le retour de telles notions manifeste bien ce que François Dosse appelle par ailleurs, pour ce qui concerne la récente histoire des sciences humaines, le « retour du sujet », [Dosse, F., 1995]. Pour notre part, nous préciserions encore cette qualification lorsqu'elle est rapportée spécifiquement à l'épistémologie et nous dirions : le retour du kantisme – de l'idée d'un sujet qui a des représentations - et de sa notion d'intuition *a priori* – même si Granger refuse de penser la construction du *virtuel* par l'imaginaire, *ibid.*, p. 14 -, voire un retour de l'ontologie. Sur le retour de l'intuition chez Granger *via* l'acceptation d'un certain intuitionnisme dans les mathématiques et dans les sciences de la nature, intuitionnisme conçu non comme intuition d'objets mais comme renvoyant à des « actes de pensée saisis comme effectivement exécutables, et capables d'exhiber des objets », on peut se référer à [Granger, G.-G., 1992], pp. 145-173. Il n'y reste pratiquement rien de la pragmatique, à part ces « actes de pensée ». Il est curieux de constater que l'ouvrage collectif consacré à la pensée de notre auteur, dirigé par Joëlle Proust et Elisabeth Schwartz (1995), fasse très peu de cas de ce que nous percevons ici comme une évolution intellectuelle décisive et significative.

[3] [Granger, G.-G., 1968], p. 117.

[4] Allusion à l'« universel concret » de Hegel.

C'est cette phase que réalise dans les sciences de l'homme le moment stylistique de la neutralisation de l'action. »[1]

Dans ce texte, sous l'expression de « renoncement provisoire », s'exprime la même conviction hégélienne que celle que nous avions précédemment perçue et analysée chez François Dagognet[2], cela alors même que ces deux épistémologues développent des approches très différentes, comme on le voit. Au passage et dans la suite, cette perspective dialecticiste et historiciste permet à Gilles-Gaston Granger d'égratigner Althusser et son *Pour Marx*. En qualifiant indirectement de simple « exégèse » la relecture puriste de Marx, il lui oppose la véritable épistémologie, représentée par sa propre approche et qui, elle, ne s'arrête pas au moment ponctuel de l'énonciation d'un style nouveau pour en faire ressortir la valeur scientifique, mais s'intéresse à son devenir historique. Althusser se voit ainsi accusé de substituer une nouvelle « Eglise » à l'ancienne et de s'en proclamer le « théologien » officiel[3].

Gilles-Gaston Granger revient alors sur la technique des modèles et sur la capacité qu'elle offre de penser correctement la stratification[4] de la structure dans les sciences, cette sorte d'arborescence entre schèmes et thèmes, mais qui ne se résout pas toujours en réductibilités réciproques[5]. Le formalisme de Gilles-Gaston Granger reste donc sur ce point foncièrement anti-réductionniste. C'est la raison pour laquelle il trouve très novatrice la méthode des modèles purement descriptifs, dits « boites noires », dans les sciences de l'homme. Elle tranche vigoureusement avec l'« idéal d'une connaissance positive »[6] qui voudrait que l'on reproduise à la fois les performances visibles d'un système et son fonctionnement interne. La méthode des modèles est sur ce point qualifiée de « plus modeste » puisqu'elle recourt le plus souvent à des « boîtes noires » qui ne sont valables qu'à un certain niveau de perception et d'« utilisation », c'est-à-dire justement à un certain niveau pragmatique, conformément à l'approche épistémologique générale de Gilles-Gaston Granger. Par là est confirmé aussi le diagnostic, qui avait été fait par lui dès 1955, selon lequel la théorie économique ne doit pas se priver de produire une macroéconomie, même et surtout si ce niveau d'analyse n'est pas réductible à la microéconomie. C'est bien là une preuve supplémentaire de la direction dans laquelle l'épistémologie peut désormais encourager la science : la pleine reconnaissance et acceptation de la stratification irréductible des formalismes. Or, cette reconnaissance passe bien par la reconnaissance préalable de la nature finalement pragmatique de la médiation entre forme et contenu, entre abstrait et concret, dans toute pensée scientifique. Il n'y a donc pas là une franche

[1] [Granger, G.-G., 1968], p. 221. Plus bas, Granger parlera du « sacrifice des significations » auquel ne veulent pas consentir le marxisme et la psychanalyse, au contraire de l'approche formelle, ce qui en fait des sciences humaines pour le moment « régressives » et non réellement scientifiques, *ibid*., p. 252. Le rejet explicite de la psychanalyse non encore formalisée nous paraît ici hautement significatif. Nous avons déjà indiqué combien l'approche épistémologique de Granger, refusant par principe de prendre conscience de ses propres ressorts cachés, comme des ressorts cachés de toute motivation humaine, avait pu, tout en s'en défendant, en être finalement la victime.
[2] [Dagognet, F., 1973], p. 45.
[3] [Granger, G.-G., 1968], p. 251.
[4] Voir [Granger, G.-G., 1968], p. 254 : « Stratification dont on pourrait croire qu'elle n'est qu'un expédient technique pur et simple pour pallier l'insuffisance de nos outils actuels. Nous pensons au contraire qu'elle est essentielle à la nature même des rapports du concret à l'abstrait. » Comme nous le verrons, c'est bien dans ce genre de propos que nous pensons déceler la grande perspicacité épistémologique de Gilles-Gaston Granger. En effet, la simulation informatique, telle qu'elle se développera dans les années 1970 et 1980, va justement rendre présente, sensible, cette imbrication, cette stratification irrésolue des formalismes.
[5] [Granger, G.-G., 1968], p. 254.
[6] [Granger, G.-G., 1968], p. 271.

rupture par rapport à la méthode scientifique classique, mais seulement une évolution[1], un déplacement qui nous fait voir plus adéquatement ce qu'est une pensée scientifique en action. D'ailleurs pour confirmer son interprétation, Gilles-Gaston Granger admet qu'il n'y a qu'une différence de degré et non de nature entre la méthode des modèles et celle qui visait une théorisation constitutive intégrale : « En fait, ce qui sépare un modèle scientifique [explicatif et théorique] d'un simple artifice de substitution [boîte noire de l'ingénieur], c'est seulement le degré d'adéquation de l'un et l'autre à l'ensemble des données phénoménales. »[2] Le déracinement n'est que de degré, dirions-nous. C'est alors l'occasion d'en conclure à une précision sur le rapport entre science et technique :

« L'orientation scientifique se distingue de l'orientation technique simplement en ceci qu'elle ne se contente pas de reproduire convenablement la transformation des entrées en sorties, mais qu'elle veut repousser de plus en plus avant dans l'organisation du modèle l'apparition de ces 'boîtes noires'. L'un des aspects de la dialectique scientifique peut être au reste décrit comme un processus de réduction des boîtes noires : ainsi le passage de la macrophysique à la physique atomique, de la physique atomique à la physique du noyau. »[3]

Suite à un renversement que l'on peut désormais s'expliquer, la méthode scientifique dans son ensemble est donc finalement à penser à partir de la méthode des modèles du type boîtes noires. Cette dernière représenterait le niveau élémentaire d'une formalisation, niveau par lequel il faudrait nécessairement passer dans toute science, *a fortiori* dans les sciences humaines. Dans la conclusion, Gilles-Gaston Granger réaffirme ainsi sa définition de la science comme « construction de modèles abstraits »[4]. Du côté des sciences de la nature cependant, le modèle abstrait est considéré comme possédant toujours finalement la fonction essentielle d'une « réduction de l'opacité et de la polyvalence du phénomène vécu à un schéma »[5]. Il s'oppose à l'usage du modèle propre à l'historien et qui vise à « recomposer la vie, l'expérience elle-même, l'événement »[6]. Car même si l'histoire s'aide de structures, elle reconduit toujours les structures à l'événement. Elle cherche à faire converger ces mêmes structures vers l'incidence de l'événement et du vécu. C'est pourquoi la différence entre sciences de la nature et sciences humaines ne tient pas du tout à la nature des modèles qu'elles utilisent – ils sont toujours des schémas abstraits - mais à la façon qu'elles ont de les mettre en œuvre : « La spécificité du travail historique va consister dans la superposition et l'entrelacs de ces modèles. »[7] Il témoigne de « *l'expression d'un certain style dans l'application aux événements* des modèles que ces sciences [sociales] ont fournis »[8].

Dans la décennie des années 1990, Gilles-Gaston Granger a cependant considérablement infléchi son projet de départ. Le vécu auquel il était selon lui si essentiel de faire barrage dans les

[1] En effet l'épistémologie de l'analyse des styles peut valoir pour des sciences nées dans le passé, donc pas forcément contemporaines de la méthode des modèles, comme c'est le cas du style mathématique de Descartes, de celui de Desargues, etc.
[2] [Granger, G.-G., 1968], p. 272.
[3] [Granger, G.-G., 1968], p. 272.
[4] [Granger, G.-G., 1968], p. 300.
[5] [Granger, G.-G., 1968], p. 300.
[6] [Granger, G.-G., 1968], p. 300.
[7] [Granger, G.-G., 1968], p. 301. Une telle position sera maintenue dans les ouvrages ultérieurs : voir [Granger, G.G, 1994], pp. 254-258.
[8] [Granger, G.-G., 1968], p. 301. C'est l'auteur qui souligne.

années 1960[1], particulièrement pour la construction de modèles rigoureux en science humaine, devient au contraire constitutif de la pertinence des modèles dans toutes les sciences en 1992[2] ! Avec la problématique générale de la « vérification » des modèles en science, Gilles-Gaston Granger se voit logiquement forcé d'abandonner son linguisticisme hégélien de principe pour thématiser enfin en détail l'intuition constructive de concepts dans les sens successivement présentés et comparés de Kant, Hilbert et Brouwer[3]. L'analyse « pragmatique » de la science est ainsi quasiment évacuée et est transformée en une réflexion classique néo-kantienne voire poppérienne[4] sur la théorie, l'hypothèse, la validation et l'expérience. Bien entendu les enseignements de Quine lui servent à présenter l'entreprise scientifique comme une stratégie holistique de vérification d'hypothèses formelles, mais la pragmatique est désormais cantonnée en une sensibilité aux « actes de pensée » constructifs des objets formels (intuitionnisme mathématique) ou aux actes de vérification empiriques. Or, selon nous, c'est bien entre autres à la distinction frégéenne entre sens et dénotation que Gilles-Gaston Granger doit un tel retournement épistémologique. Dans le livre de 1992, on perçoit en effet une prise en considération inédite chez lui du fait qu'en mathématique même « l'information apportée par le sens des propositions arithmétiques n'est nullement […] réduite à des règles de langage » et que « les objets mathématiques quoique analytiquement dérivés, ont donc pour ainsi dire parlé des contenus de sens. »[5] On comprend que le retour de l'intuition lui paraisse dès lors une nécessité. Aussi écrit-il en préambule : « Dans une première partie, je tenterai de préciser la question préliminaire du rapport de la connaissance symbolique (c'est-à-dire exprimée dans un 'langage') à la connaissance 'intuitive', du point de vue de l'idée de vérité. »[6] La perspective anti-intuitive des premières années est donc désormais bien loin. L'iconoclasme n'est plus aussi présent que dans les œuvres de l'après-guerre. La preuve en est la réhabilitation elle aussi tardive de la notion d'imagination conceptuelle dans l'ouvrage paru en 2000[7]. La réalité[8] (elle aussi réhabilitée) pose cette fois-ci le problème de « mise en forme » adéquate dans les sciences de l'empirie. Les « styles » sont définitivement remplacés par des « représentations » ou des « schématisations », comme c'est le cas pour la « représentation mécanicienne » de l'électrocinétique naissante[9], par exemple. Les « schèmes » et les « thèmes » de la première époque sont remplacés par le « virtuel » et l'« actuel ». Le « virtuel » est défini comme étant ce qui n'est pas actuel et n'entretient

---

[1] Ce revirement confirme bien notre hypothèse – de nature psychosociologique et historique – sur le caractère essentiellement circonstanciel – lié à l'après-guerre - de l'insistance avec laquelle Granger voulait que les sciences se coupent du vécu.

[2] [Granger, G.-G., 1992], p. 14 : « Les *énoncés* scientifiques vérifiés, si abstraits qu'ils paraissent, si prédominante qu'y soit la médiation des modèles abstraits, *renvoient en dernier ressort à un vécu*, ou plus exactement à quelques aspects des vécus individuels dont la communication peut être, dans la mesure qui convient à chaque cas, contrôlée. » C'est l'auteur qui souligne.

[3] [Granger, G.-G., 1992], chapitre 6.

[4] [Granger, G.-G., 1992], p. 225.

[5] [Granger, G.-G., 1992], p. 74. Voir le rappel de cette distinction que fait Granger lui-même, *ibid*., p. 71 : La dénotation d'un signe, selon Frege, est l'objet de pensée à quoi renvoie le signe, alors que le sens est « le mode de donation de l'objet. » Par exemple, le « signe » suivant, à savoir « la suite qui converge le moins rapidement », a un sens mais pas de dénotation car ne renvoyant à aucun objet de pensée adéquat. On y a un mode de donation mais pas un objet. Un exemple fameux que donne également Frege est celui-ci : « La dénotation d' 'étoile du soir' et d''étoile du matin' serait la même mais leur sens serait différent », [Frege, G., 1892, 1971, 1994], p. 103.

[6] [Granger, G.-G., 1992], p. 15.

[7] [Granger, G.-G., 2000], troisième partie : « l'imagination conceptuelle ». Dans cet ouvrage, la question de la pertinence des modèles abstraits redevient la question traditionnelle de la conformité entre la réalité - sensible ou humaine – et nos représentations abstraites : voir *ibid*., p. 139.

[8] [Granger, G.-G., 1992], p. 243 : « La réalité des objets de science signifierait donc, selon nos analyses, un certain rapport entre un aspect virtuel [les anciennes structures formelles] et un aspect actuel de la représentation de l'expérience. »

[9] [Granger, G.-G., 1992], pp. 146-149.

pas de rapport avec lui, à la différence du possible et du probable. Il nous faut prendre garde ici que ce « virtuel » n'est justement pas le virtuel de l'infographie ou de l'informatique. Il caractérise bien plutôt les mathématiques elles-mêmes et leur rôle dans les sciences. Si bien que ce « virtuel »-là devient en fait actuel lorsqu'il est traité par ordinateur. Dans cette perspective, si nous ne sollicitons pas trop le texte et si nous le comprenons bien, la simulation informatique (dont Gilles-Gaston Granger ne parle pas expressément) passerait pour une forme d'actualisation du « virtuel » mathématique : ce serait donc une sorte d'expérience. Ce qui justifie sans doute le fait qu'à la fin de cet ouvrage, Gilles-Gaston Granger en vienne à la question ontologique de l'accession de notre savoir à l'être. C'est cette question qui désormais le préoccupe, dans le cadre de sa réflexion sur les sciences. Il prône alors un réalisme bien-tempéré. Ainsi, aujourd'hui, serait-il peut-être moins disposé à affirmer, comme il le faisait encore dans un courte conférence de 1988 sur « Simuler et comprendre », que « la simulation apparaît comme le degré le plus bas d'une échelle dont les degrés supérieurs seraient la compréhension et l'explication »[1]. Une telle perspective intellectualiste sur la simulation restait encore fortement déformante et teintée de linguisticisme. Elle caractérise, selon nous, une période de transition propre à la pensée de Gilles-Gaston Granger.

Pour finir sur cette figure de l'épistémologie contemporaine, même si notre auteur semble ignorer les simulations informatiques les plus contemporaines, nous verrons, dans la suite, combien cette tendance récente chez lui, mais plus ou moins consciente, à dépasser le linguisticisme et à s'attaquer de nouveau au problème de l'intuition et de l'imagination conceptuelle, se présente comme la seule voie actuelle susceptible de mener à une compréhension du statut épistémologique de certaines simulations réalistes.

Le langage du virtuel selon Philippe Quéau

En 1986 paraît, en France, *Eloge de la simulation – De la vie des langages à la synthèse des images*, un essai assez influent écrit par Philippe Quéau, alors chercheur en poste à l'Institut National de la communication – INA. Cet essai nous semble à maints égards un des plus lucides et des mieux informés sur les questions qui tournent autour du statut de la modélisation et de la simulation informatique. Toutefois, du début jusqu'à la fin, ce texte manifeste symptomatiquement une permanente oscillation entre une interprétation purement linguisticiste et scripturaire de l'image et le dépassement de cette vision réductrice, dépassement que son auteur pressent comme indispensable devant l'afflux des nouveaux modes de simulation, mais sans pouvoir le concevoir exactement parce que ne s'appuyant justement que sur les philosophies de Michel Serres ou de François Dagognet. Ce texte qui se situe à la croisée des chemins interprétatifs, en ce milieu des années 1980, nous semble ainsi confirmer nos doutes au sujet des épistémologies françaises quant à leur capacité à penser la simulation dans toutes ses dimensions. Mais qu'en est-il exactement ?

Remarquons tout d'abord que, sous l'influence permanente et explicite des travaux de François Dagognet, et sous l'effet du principe hégélien selon lequel « il n'y a pas de pensée sans signe »[2], la réduction de toute représentation à un langage ou une écriture est, dans ce texte,

[1] [Granger, G. G., 1988, 2003], p. 191.
[2] [Quéau, P., 1986], p. 61.

exprimée comme une évidence incontestée pratiquement à toutes les pages[1]. C'est la raison pour laquelle les 100 premières pages (tout le chapitre 1) traiteront longuement des métaphores en élargissant leur usage habituellement linguistique à toute forme de représentation imagée. Ce faisant, l'auteur se rend fortement dépendant de l'iconoclasme résiduel propre à la philosophie de François Dagognet : le refus d'une image qui ne serait que redoublement. Car si le terme de « simulation » ne reprend pas le sens méprisé qu'il avait chez François Dagognet (il est en effet impossible à l'auteur de récuser à lui seul un vocable massivement employé dans la pratique scientifique, notamment américaine, depuis les années 1950), elle n'y est cependant définie que comme la traduction numérique d'un modèle[2] ou l'expérimentation d'un modèle[3] ou bien encore l'exploration d'un modèle[4]. Pour l'auteur, elle restera donc logiquement, et par principe, toujours dépendante de la nature scripturaire des modèles mathématiques. Ainsi Philippe Quéau ne peut-il interpréter l'émergence de la simulation informatique que comme celle d'« un nouvel instrument d'écriture »[5]. D'où l'enjeu principal de son livre et qui s'ensuit logiquement : préparer les hommes à accueillir ces nouveaux systèmes de signes et de symboles, en prolongement si ce n'est en lieu et place du langage naturel, et qui, en tant que nouveaux lieux de créations symboliques, leur permettront d'élargir leurs conceptions du monde, une fois que ces systèmes auront bien sûr été soumis aux tests et validations habituels.

Mais, par ailleurs, et de façon assez contradictoire, notre auteur pressent également qu'une nouvelle forme de donation du monde se fait jour à travers la simulation informatique, au-delà de la pure recombinaison de symboles formels. Ce qui n'est pas le moindre de ses mérites. Or, s'il prend ce phénomène en considération[6], il l'interprète assez vaguement comme une nouvelle forme de donation de mondes en général, comme une donation fictive donc, et n'ouvrant la porte qu'à de nouvelles explorations formelles ; ce qui est en fait une manière pour lui de continuer à marginaliser le caractère de simple reproduction du réel propre à certaines images de synthèse, tout en revalorisant la simulation[7], et cela en conformité avec les philosophies contemporaines sur lesquelles il s'appuie. Comme s'il voulait refouler cette tendance à dépasser l'iconoclasme résiduel, l'auteur va ainsi jusqu'à tâcher de se persuader, d'une manière qui paraît dès lors

---

[1] [Quéau, P., 1986], pp. 16, 28, 31, 61, 67, 73, 77, 78, 139, 176, 178, 180, 211 et 235, par exemple. Voir particulièrement la page 31 : « l'image est trace, symbole scriptural, signe combinable, schéma abréviateur, carte panoptique. Elle permet de simplifier, de miniaturiser, de rassembler, de rapprocher. »

[2] [Quéau, P., 1986], p. 85.

[3] [Quéau, P., 1986], p. 85.

[4] [Quéau, P., 1986], pp. 160-161.

[5] [Quéau, P., 1986], p. 116.

[6] On trouve en effet çà et là des propos directement contradictoires avec les prémisses de la philosophie de François Dagognet : « Après le rêve de la condensation du réel en quelques formules mathématiques, on en vient de plus en plus à leur préférer la simulation algorithmique par ordinateur » (*Ibid.*, p. 151), ou bien : « Les conditions sont réunies aujourd'hui pour que le langage cède une part importante de son pouvoir de représentation à des systèmes numériques et symboliques nouveaux » (*Ibid.*, p. 156) ou bien encore : « L'ordinateur cesse d'être l'apanage des compositeurs de logiciels et de programmes, il devient accessible aux instrumentistes, aux virtuoses de l'interprétation 'sensible' » *(Ibid.*, p. 218). Mais, de façon suggestive, à aucun moment l'auteur ne s'autorise à en passer à une philosophie de la néo-sensibilité. Il préfère s'en tenir sagement à une philosophie de la « néo-écriture ». La perplexité que nous supposons à l'auteur de cet ouvrage peut se confirmer à la lecture de certaines questions qui demeurent chez lui prudemment ouvertes, comme celle-ci : « La simulation fait-elle sens ou seulement signe ? » Le malheur veut que l'auteur ne cherche justement pas à explorer également les deux pans de cette alternative si claire, mais se cantonne à l'hypothèse de la simulation-signe.

[7] En affirmant qu'elle est véritablement une image, mais au sens de François Dagognet – représentation condensante, etc. - et non pas donc une image pléonastique ou de pur redoublement ! On perçoit là le simple déplacement qui s'opère par rapport à François Dagognet : ce que François Dagognet fustigeait sous le terme de « simulation » devient la simulation reproductrice chez Quéau. Et ce dernier considère, dans le même mouvement, qu'une telle forme dégénérée de simulation n'existe tout simplement pas, cela pour régler la question du risque de l'idolâtrie qui hante encore toute l'œuvre de François Dagognet.

excessivement forcée, que « les imageries informatiques ne cherchent pas à copier le réel »[1]. Autrement dit, il veut continuer quand même à affirmer que ce qui était valable pour les modèles mathématiques l'est encore pour tous les usages actuels de la simulation, ce qui nous paraît clairement irrecevable au vu des simulations pluriformalisées. Autrement dit, dans ce texte, n'est jamais clairement décidée la question de savoir si, depuis la simulation informatique, la nature de l'image demeure toujours celle d'une écriture, d'un langage ou si elle peut devenir l'objet d'intuitions élargies non directement verbalisées ou symbolisées. L'auteur semble osciller entre les deux.

Huit ans plus tard, dans son ouvrage de 1994, Philippe Quéau est placé face à la difficulté nouvelle de penser les mondes virtuels. Pour cela, il maintient fermement l'idée de principe selon laquelle « les images de synthèse sont d'abord du langage »[2], ce qui, dans le cas des simulations interactives propres au réalités virtuelles, le place dans une situation épistémologique très inconfortable. Il est en effet obligé de parler d'une « incarnation abstraite »[3] en se refusant toujours d'en passer par une réflexion sur une éventuelle intuition sensible à travers les images simulées, quoique sur ce point l'option dagognésienne parfois vacille. De plus, le passage de sa réflexion aux images virtuelles interactives lui permet de poursuivre dans un iconoclasme résiduel d'un type nouveau : les images seulement simulées, donc non interactives, et dont il avait été uniquement question dans le livre de 1986, sont, cette fois-ci, contenues dans un rôle de représentation statique, donc d'éventuel pur redoublement, au profit des images virtuelles interactives qui, parce qu'elles sont dynamiques et se prêtent à l'exploration *via* l'interaction avec notre corps, sont considérées comme bien différentes des « imageries de pure représentation »[4]. Le virtuel apparaît alors comme ce qui peut sauver les images simulées de leur destin de simples idoles par le biais du temps rédempteur. Dans le cas du virtuel, Philippe Quéau finit quand même par admettre que les images perdent quelque peu de leur nature langagière car on peut « s'incorporer les images, les vivre de l'intérieur »[5] :

« Le rôle prédominant du corps dans le système virtuel en tant qu'élément actif et moteur, et non pas seulement récepteur passif et immobile, apporte une dimension absolument nouvelle par rapport aux techniques classiques de représentation spectaculaire comme la télévision ou le cinéma. Les techniques du virtuel convoquent le corps du spectateur-acteur au sein de l'espace simulé, elles lui offrent le moyen le plus naturel, le moins codé linguistiquement, de s'incorporer les images, de les vivre de l'intérieur. »[6]

Ce passage qui semble s'émanciper du linguisticisme (même s'il nous sauve encore de la *theoria* par la *praxis*) contredit cependant d'autres passages plus classiques sur le virtuel : « les mondes virtuels sont des labyrinthes plus formels que matériels. Cette forme du virtuel est d'essence langagière. »[7] Selon nous, la difficulté de l'entreprise philosophique de Philippe Quéau vient du fait qu'il tient pour acquis que, dans ces mondes virtuels, on n'expérimente de nouveaux rapports qu'« entre les concepts et les percepts, entre les phénomènes perceptibles et les

[1] [Quéau, P., 1986], p. 253.
[2] [Quéau, P., 1994], p. 30. Voir également les réaffirmations de l'image simulée comme « nouvelle écriture » : pp. 29, 39, 45, 87.
[3] [Quéau, P., 1994],. 30.
[4] [Quéau, P., 1994], p. 15.
[5] [Quéau, P., 1994], p. 16.
[6] [Quéau, P., 1994], p. 16. C'est nous qui soulignons.
[7] [Quéau, P., 1994], p. 87.

phénomènes intelligibles »[1] : le virtuel ne nous servirait qu'à imaginer le formel, à explorer concrètement le modèle logico-mathématique qui le sous-tend, sans pourtant que sa « substance intelligible »[2] y soit totalement exprimée. Il demeurerait donc une espèce de supériorité, irréductible et obscure, du modèle sur l'image sentie, cette dernière ne servant qu'à instancier le modèle, façon pour l'auteur de préserver là encore une forme d'iconoclasme. Ainsi, à aucun moment, l'auteur n'évoque la possibilité que les mondes virtuels soient l'occasion de multiplier les rapports entre les seuls percepts, ce qui l'aurait obligé à penser la possibilité d'une intuition sensible élargie, celle d'un élargissement de l'expérience sensible, celle d'expériences virtuelles en lien avec le réel. Le seul risque ou la seule possibilité qu'il veut voir poindre derrière l'émergence des réalités virtuelles tient au constat que le virtuel nous installerait toujours dans un autre monde ou dans une autre vision du monde, bien différente de celle qui nous est habituelle, au delà donc de la « logique juxtaposante »[3] de notre monde trivial. Dans un seul passage pourtant, notre auteur évoque le fait que les « illusions virtuelles […] ne sont pas toujours fausses ou trompeuses, et [que] d'ailleurs beaucoup d'applications industrielles et scientifiques tirent avantage de la capacité des mondes virtuels à saisir efficacement le réel »[4]. Mais il ne va pas plus loin, ce qui, à sa décharge, peut s'expliquer par le biais que lui occasionne sa propre pratique à l'INA et par le fait qu'en France, les recherches en images virtuelles ou de synthèse ont essentiellement reçu des subsides de la part du Ministère de la Culture dans les années 1980, c'est-à-dire bien avant (4 à 5 ans avant) que le Ministère de la Recherche et le CNRS y voient un réel enjeu scientifique. Philippe Quéau réfléchit donc ici davantage sur le virtuel ludique, médiatique (les communautés virtuelles sur Internet) ou pédagogique (les simulateurs de vol par exemple) que sur le virtuel valant comme instrument scientifique dans la recherche.

Pierre Lévy et les « pouvoirs accrus de l'imagination »[5]

Les réflexions de Pierre Lévy prennent également acte du fait qu'avec l'informatique, « l'accès direct aux choses s'éloigne d'un cran supplémentaire »[6]. Mais, sous l'influence d'une perspective davantage phénoménologique et anthropologique, il n'en vient pas aussi facilement que ses contemporains à un nouvel iconoclasme. En effet, à partir d'une réflexion qui lui permet de désacraliser le rôle de la raison mathématique dans la connaissance, il parvient à rendre compte du caractère empirique de la simulation informatique tout en la distinguant assez précisément de l'expérience réelle. Tout d'abord, à l'issue de rappels historiques sur les conditions intellectuelles de la naissance de l'ordinateur, il en vient à remarquer que « depuis près d'un demi-siècle, la connaissance bascule peu à peu du côté des procédures effectives, de la computation et de l'information opérationnelle »[7]. Il en déduit que « notre science ne sera peut-être bientôt plus mathématique »[8]. En conformité avec cette interprétation, il indique qu'« un des premiers effets de l'usage de la simulation numérique est de conférer un caractère expérimental à des disciplines qui ne le possédaient pas, comme la cosmologie ou la démographie »[9]. Cependant Pierre Lévy ne fait pas l'économie de la question immédiate qui se pose alors : quelle est la différence de nature entre

[1] [Quéau, P., 1994], p. 34.
[2] [Quéau, P., 1994], p. 30.
[3] [Quéau, P., 1994], p. 103.
[4] [Quéau, P., 1994], p. 93. Donc il y aurait quand même un bon usage de la reproduction du réel en science…
[5] [Lévy, P., 1990, 1993], p. 142.
[6] [Lévy, P., 1987, 1992], p. 12.
[7] [Lévy, P., 1987, 1992], p. 105.
[8] [Lévy, P., 1987, 1992], p. 105.
[9] [Lévy, P., 1987, 1992], p. 132.

expérience réelle et expérience virtuelle, en science ? Il répond assez précisément en indiquant d'abord ce qui les apparente et ensuite ce qui les distingue. Ce qui apparente ces deux types d'expérience, et qui leur vaut cette commune dénomination, consiste dans la faculté qu'ils ont de surprendre le chercheur[1]. Pierre Lévy opte ici pour une légitimation psychologique, voire seulement phénoménologique, de ce rapprochement entre les deux pratiques. On conçoit qu'elle ne saurait convenir telle quelle aux philosophes des sciences dont nous avons précédemment synthétisé les positions. Qu'est-ce qui distingue ensuite, selon lui, ces deux pratiques ? La distinction entre les deux tient au fait que la surprise vécue au spectacle d'une simulation ne s'explique pas de la même façon, qu'elle n'est pas due aux mêmes entraves que celles qui subsistent lorsque nous avons affaire à une expérience réelle : « Le résultat d'une simulation, même surprenant, était logiquement contenu dans un ensemble de possibles précodés par l'algorithme et les données. »[2] Cette surprise n'est due qu'à une limitation dans l'usage de notre propre faculté logico-mathématique. En revanche, « la surprise réelle est capable d'ouvrir un nouveau champ de virtualités »[3] car elle incite le chercheur à repenser son modèle formel voire à le modifier au contact avec le réel. Cette surprise est donc due à une ignorance au sujet de la pertinence du modèle formel choisi par rapport au réel, mais pas à une ignorance du comportement de la représentation formelle elle-même. Par la suite, Pierre Lévy s'interroge sur la possible convergence ou identité de ces deux opacités dont les types paraissent, à première vue, bien différents. C'est la raison pour laquelle il s'oriente vers la question ontologique du caractère calculable ou non de l'univers, de la vie et de la pensée. C'est alors l'occasion pour lui de s'interroger sur la nature calculatoire des représentations humaines (notamment les images[4]), en interpellant les programmes actuels de l'intelligence artificielle ou de naturalisation de l'esprit. Ces questions sont laissées délibérément ouvertes par l'auteur, mais il ne cache pas sa préférence pour la thèse de l'irréductibilité du vécu au calculatoire[5].

Néanmoins, ce qui distingue les analyses de Pierre Lévy des précédentes provient du fait que, dans le développement de la simulation numérique, on n'aurait pas simplement affaire à une nouvelle forme de langage ou d'écriture, mais à une évidente « prise de pouvoir du calcul sur le langage, déchu de sa souveraineté ontologique »[6]. Il nous invite alors à nous interroger sur la légitimité d'une telle opération. L'ordinateur, qualifié de « machine univers » parce que prétendant tout ramener à terme au calcul, est donc ici conçu sous la forme d'une machine fournissant des représentations multiples. Certes, ces représentations sont bien évidemment de nature formelle. Elles incitent donc à poser nouvellement la question de la réduction de l'univers (y compris de ce que la tradition philosophique appelle matière ou qualité seconde : sensation, couleurs, odeurs, etc.) non plus aux mathématiques ni donc à leurs modèles synthétiques (ce qui serait sacrifier encore à la vieille question portant sur la légitimité de l'option galiléenne) mais au calculable, au « computable ».

Pierre Lévy a donc le mérite d'indiquer précisément en quoi la problématique des liens entre l'abstrait et le concret ne peut plus se présenter aujourd'hui tout à fait sous la même forme

---

[1] [Lévy, P., 1987, 1992], p. 135.
[2] [Lévy, P., 1987, 1992], p. 135.
[3] [Lévy, P., 1987, 1992], p. 135.
[4] [Lévy, P., 1987, 1992], p. 197.
[5] « Le sujet demeure, enfoui au plus profond des replis du corps, dispersé parmi la beauté du monde […] », [Lévy, P., 1987, 1992], p. 223.
[6] [Lévy, P., 1987, 1992], p. 222. Voir aussi p. 209 : « En considérant la source de la représentation [le sujet] comme une machine à calculer, on objective le sujet, *on traite le transcendantal comme de l'empirique* […] c'est ce par quoi il y a du sens qui entre dans le champ de l'opératoire. Langage et calcul ont inversé leurs relations. Désormais le calcul gouverne la transcendance. » C'est l'auteur qui souligne. Voir également p. 220 : « L'opérationnalité supplante l'intelligibilité. »

que naguère : il ne s'agit plus seulement de penser le rapport entre notre pouvoir d'abstraction synthétique (le langage et, plus spécifiquement, les mathématiques) et le réel, mais plutôt le rapport entre une technique d'extériorisation et d'objectivation de la pensée calculante, du traitement pas à pas de symboles qui sont des substituts du réel, avec le réel lui-même[1].

Dans ce texte, la position iconoclaste résiduelle de Pierre Lévy (y aurait-il quelque chose qui échappe au calcul ?), demeurant sous forme de question, ne peut dès lors, et en toute logique, que se réfugier dans une vision phénoménologique qui, devant la nouveauté des interrogations, demeure quelque peu désabusée et n'est rien moins que triomphante, surtout au vu du développement considérable et irrépressible du paradigme du calcul.

Par la suite, dans son ouvrage de 1990, Pierre Lévy semble davantage croire dans le « bouillonnement infini du réel »[2] et donc au fait que le réel échappera toujours à son absorption dans la machine univers. Il tient ainsi à infléchir le pessimisme qui le guidait encore deux ans auparavant. C'est qu'il avait conservé, à tort selon lui[3], une vision holistique et indûment abstraite de l'émergence du paradigme du calcul, alors qu'il faut désormais prendre conscience que ce sont les acteurs qui, à l'échelle locale, ont fait progressivement se durcir ces dispositifs techniques de représentation du monde. On aurait ainsi tort de penser ces acteurs comme pris dans les rets de certaines entités abstraites (la Technique, l'Informatique, etc.) devenues autonomes et menaçantes, comme le firent Heidegger et Ellul, par exemple. C'est donc dans un horizon plus pragmatique, mais aussi plus proche du terrain et des véritables réalisations logicielles, que Pierre Lévy regagne en optimisme. Il prône ainsi une « théorie herméneutique de la communication »[4] selon laquelle la construction du sens ne serait pas due à la circulation abstraite et impersonnelle des messages dans le médium, mais à une construction multi-niveaux, écologique et épigénétique du sens (théorie notamment soutenue par la métaphore de l'hypertexte) et par laquelle notre auteur rectifie les idées trop mécanistes et sclérosantes qui lui étaient auparavant venues des premiers travaux de Michel Serres. À travers ces quelques indications, comprenons que ce qui fait que la forme ne nous rend finalement jamais totalement oublieux du fond (et donc qu'elle ne violente pas le réel comme une machine oppressive qui tuerait la richesse des images réellement vécues) c'est qu'elle se présente toujours et ouvertement avec ses hypertextes, c'est-à-dire précisément comme un puits sans fond : le fond de la forme informatique, c'est le fait qu'elle nous indique clairement qu'elle n'en a pas, et qu'elle nous renvoie ainsi toujours indéfiniment à d'autres formes ; c'est sa récursivité intrinsèque qui fait son sens[5]. Significativement, dans cette perspective anthropologique davantage inspirée de l'individualisme méthodologique, Pierre Lévy prête une attention particulière au fait que, par le développement des langages de programmation orientés-objets, les ordinateurs deviennent de plus en plus des machines à simuler et non plus seulement des machines à calculer[6]. Ainsi, il indique que :

« La relation avec le modèle ne consiste plus à modifier certaines variables numériques d'une structure fonctionnelle abstraite, elle revient à agir directement sur ce que l'on considère intuitivement comme les acteurs effectifs d'un environnement d'une situation donnée. On améliore

---

[1] Et où les barrières entre réalité et virtualité ne sont plus aussi évidentes que dans l'ère glorieuse des modèles mathématiques structurels, condensants et supposés ne valoir que par leur seule isomorphie.
[2] [Lévy, P., 1990, 1993], p. 217.
[3] Voir [Lévy, P., 1990, 1993], pp. 18-21, où l'auteur tient à rectifier de façon circonstanciée l'approche de son ouvrage précédent.
[4] [Lévy, P., 1990, 1993], pp. 80-82.
[5] [Lévy, P., 1990, 1993], p. 81.
[6] [Lévy, P., 1990, 1993], pp. 138-139.

ainsi non seulement la simulation des systèmes, mais encore la simulation de l'interaction naturelle avec les systèmes. »[1]

Ce passage nous paraît capital car il indique dans quels termes Pierre Lévy pressent qu'il faut comprendre le dépassement nécessaire de toute conception « linguisticiste » des simulations informatiques. Ce n'est donc pas par hasard que ces quelques lignes sont immédiatement suivies d'une réflexion qui, en tirant toutes les conséquences, pourrait bien paraître à beaucoup comme aventureuse. Pierre Lévy (en franchissant un cap épistémologique que nous jugeons crucial) y affirme en effet que la simulation informatique est finalement plutôt à comprendre comme une augmentation de notre « faculté d'imaginer »[2]. C'est même pour lui « une imagination assistée par ordinateur »[3]. Certes toute simulation repose sur des modèles formels, mais ils peuvent être complexes, et, dans tous les cas ces modèles sont « bricolés »[4] de façon à ce que la simulation donne des images ressemblant au réel, sans nécessairement que leurs procédés de construction soient censés expliciter une représentation théorique du phénomène réel et de ce qui lui est sous-jacent. La simulation est donc ici conçue comme un bricolage représentatif, dans ses seules performances, d'une réalité sentie ou mesurée par ailleurs. C'est précisément la raison pour laquelle on ne peut plus faire à la simulation le même procès que l'on faisait aux modèles mathématiques : « La simulation ne renvoie donc pas à quelque prétendue déréalisation du savoir ou du rapport au monde, mais bien plutôt à des pouvoirs accrus de l'imagination et de l'intuition. »[5]

Pierre Lévy termine son ouvrage par l'idée qu'il faudrait désormais se représenter l'essor de l'informatique dans le cadre d'une « écologie cognitive » généralisée. Autrement dit, il faudrait considérer que « les phénomènes sociaux sont des activités cognitives »[6] et que, symétriquement, les phénomènes cognitifs sont des phénomènes sociaux, cela en conformité avec l'approche récente de l'intelligence artificielle distribuée. Ainsi, l'image et avec elle l'imagination, par les moyens nouveaux de l'informatique, gagneraient un nouvel élan et une véritable légitimité cognitive puisque le fait de procéder par essais, confrontations et erreurs leur redonnerait un rôle central.

Cependant, avec l'affirmation générale des paradigmes du calcul et des interfaces, Pierre Lévy ne va pas jusqu'à expliciter dans quelle mesure le modèle mathématique ne peut passer pour une figuration sensible alors qu'une simulation le peut. D'autre part, ses propos n'ont pas convaincu : ils n'ont pas été relayés par les philosophes ou les scientifiques[7]. Cela tient au fait que l'explication de la parenté entre la simulation et l'expérience réelle laisse à désirer dans la mesure même où elle part d'une approche psychologiste, approche depuis longtemps[8] assez unanimement bannie de la philosophie des sciences françaises. Pour se convaincre de la réalité de ce bannissement, il

[1] *Ibid.*, p. 140. C'est l'auteur qui souligne.
[2] [Lévy, P., 1990, 1993], p. 140.
[3] [Lévy, P., 1990, 1993], p. 140.
[4] [Lévy, P., 1990, 1993], p. 140.
[5] [Lévy, P., 1990, 1993], p. 142.
[6] [Lévy, P., 1990, 1993], p. 164.
[7] À notre connaissance, ces textes sont très peu cités, à la différence de tous les précédents. Ils ne sont donc pas considérés comme des travaux suffisamment sérieux.
[8] Depuis les derniers travaux de Bachelard, mais aussi depuis ceux de Cavaillès, Desanti et Lecourt.

n'est besoin que de se référer à un ouvrage, constamment cité en revanche[1], celui de Dominique Lecourt, intitulé *Pour une critique de l'épistémologie*[2] et publié en 1972.

Pour finir notre survol analytique des réflexions de Pierre Lévy sur la simulation, on peut noter qu'il est important pour lui que les images simulées finissent par regagner du fond, du contenu et donc du sens, par rapport aux formes dont elles émanent. Ce en quoi il ne peut être dit tout à fait iconoclaste au même titre que les auteurs précédents. Ce sont en effet les « interfaces » informatiques, dont la nature est d'ouvrir récursivement et sans fin à d'autres interfaces (comme les hypertextes), qui le conduisent à une sorte de néo-leibnizianisme technologique pourrait-on dire, inspiré notamment de la philosophie de Michel Serres mais aussi des derniers travaux de Gilles Deleuze : l'image formelle a réellement un fond mais qui consiste seulement en un repliement en elle d'une infinité d'autres images formelles[3]. Son analyse de l'élargissement de l'intuition sensible par le recours à la simulation semble intrinsèquement liée à une réhabilitation du contenu de l'image mais seulement en tant qu'emboîtement et intrication de formes innombrables. Davantage, le corps est conçu par lui comme une interface de même nature que les interfaces informatiques : il est une forme qui en appelle une infinité d'autres, mutuellement intriquées entre elles. Pierre Lévy pense pouvoir régler le problème de l'oubli du fond dans la forme en rendant ainsi notre propre corps sentant homogène aux formes qui sont simulées par les nouvelles techniques. Ainsi, en même temps, mais implicitement, il pense la nature elle-même (que ces techniques simulent) à l'image d'un corps mystique informationnel. À la fin de ce deuxième livre, nous sommes donc reconduits à la question demeurée ouverte à la fin du premier : le formel calculatoire, mais présentant aussi des emboîtements de formes à l'infini, peut-il suffire à réaliser de la sensation *ex nihilo*, c'est-à-dire à rendre sensible une image simulée ? Sous cette présentation modifiée, Pierre Lévy semble, cette fois-ci, vouloir répondre par l'affirmative car toute sensation ou intuition est déjà en elle-même une interface alors qu'il lui avait semblé auparavant difficilement tenable qu'elle ne soit qu'un calcul.

Par la suite[4], Pierre Lévy consacrera davantage sa réflexion à la construction actuelle de ce qu'il appelle une intelligence collective *via* la technologie de l'internet. L'espace virtuel étant un espace déterritorialisé[5], il permet le développement de communautés virtuelles et la constitution d'un nouveau réel collectif, co-construit. Il s'éloigne donc d'une réflexion sur les modèles et la simulation pour ne plus réfléchir qu'à partir de la capacité propre au virtuel de ne pas être consommateur d'information et de s'offrir ainsi au regard d'un nombre considérable de personnes.

---

[1] Chez les scientifiques, voir par exemple [Legay, J.-M., 1973] et [Legay, J.-M., 1997]. Chez les philosophes, voir [Nouvel, P., 2002].

[2] [Lecourt, D., 1972]. Voir particulièrement la critique du psychologisme de Bachelard pp. 48, 52 et 63. Dominique Lecourt critique, dans l'épistémologie bachelardienne, cette façon qu'elle a d'utiliser indûment les concepts scientifiques comme métaphore de l'activité scientifique, cette activité étant elle-même comprise au seul niveau de la psychologie du sujet. Ce faisant, elle laisse en effet passer, dans l'écart qu'ouvre la métaphore, une idéologie qu'aucune épistémologie psychologiste ne saurait désamorcer. C'est le cas notamment de la notion de « couplage » empruntée par Bachelard à l'électrodynamique pour métaphoriser les relations entre l'abstrait et le concret telles qu'elles interviennent dans l'activité scientifique (*ibid.*, pp. 62-63). D'où le choix final de Lecourt : « Pour notre part, du 'couplage' nous laisserons tomber la métaphore – indice d'un substitut de théorie de la connaissance – et nous garderons la dialectique… » (*ibid.*, p. 63).

[3] Voir [Deleuze, G., 1988]. Voir [Lévy, P., 1990, 1992], pp. 205-206 : « Qu'est-ce qui passe à travers l'interface ? D'autres interfaces. Les interfaces sont impliquées, repliées, froissées, déformées les unes dans les autres, les unes par les autres, détournées de leurs finalités initiales. Et cela jusqu'à la dernière enveloppe, jusqu'au dernier petit pli. Encore une fois, s'il y a contenu, on doit l'imaginer fait de contenants emboîtés, agglomérés, pressés, tordus… L'intérieur est composé d'anciennes surfaces prêtes à surgir, plus ou moins visibles, contribuant à définir un milieu continûment déformant. Si bien qu'un acteur quelconque n'a rien de substantiel à communiquer mais toujours d'autres acteurs et d'autres interfaces à capter, chasser, envelopper, détourner, déformer, connecter, métaboliser. » L'idée que l'intérieur serait fait d'anciennes surfaces est à comparer avec le résultat de l'analyse épistémologique des sciences de la terre faite dans les mêmes termes par François Dagognet *in* [Dagognet, F., 1984].

[4] Voir notamment [Lévy, P., 1998].

[5] [Lévy, P., 1998].p. 56.

Dans cette perspective, il intervient davantage dans le débat actuel sur la dématérialisation des échanges, de l'économie et du travail, que dans des débats directement épistémologiques.

Daniel Parrochia : la simulation, à la fois empirie nouvelle et instrument d'intellection

C'est essentiellement à partir du colloque organisé par le CNRS en juin 1989, intitulé « La modélisation : confluent des sciences », que Daniel Parrochia commence à participer à la réflexion sur les modèles. Cette première contribution fait la synthèse du contenu de la plupart des travaux existant alors en langue française, et que nous avons déjà évoqués, concernant l'histoire de la modélisation : ceux de Pierre Duhem, Gaston Bachelard, Suzanne Bachelard et Georges Canguilhem. Daniel Parrochia définit alors le modèle, en sciences expérimentales, comme un « système homomorphe à un système donné »[1]. Ce qui le conduit à reprendre textuellement la caractérisation de Suzanne Bachelard qu'elle avait, elle-même, reprise à Georges Canguilhem[2] :

« Le modèle n'est rien d'autre que sa fonction ; et sa fonction est une fonction de délégation. Le modèle est un intermédiaire à qui nous déléguons la fonction de connaissance, plus précisément de réduction de l'encore-énigmatique, en présence d'un champ d'étude dont l'accès, pour des raisons diverses, nous est difficile. »[3]

Dans la lignée d'un certain mathématisme à la française, il tient ensuite à réaffirmer et à étendre l'analyse de Suzanne Bachelard, analyse qui consistait déjà à amplifier considérablement le rôle du « structuralisme mathématique » du début du 20ème siècle dans le développement de la modélisation :

« Nul doute que l'entreprise de modélisation, dans les sciences exactes comme dans les sciences humaines, ait largement bénéficié de ce mouvement, qui, avec ces outils d'investigation formels, apporte un véritable langage de la comparaison des formes. »[4]

Concentrant ensuite ses réflexions sur les limites que la modélisation lui semble présenter, il tient à rappeler les mises en garde de Bachelard au sujet de la figuration des images familières. Il faudrait les interpréter comme des obstacles épistémologiques quasi-obligés. La modélisation consiste en effet à représenter de l'inconnu par du déjà connu, ce qui la met en position d'introduire des idéologies[5] ou de se livrer à des « placages » illégitimes, selon le terme qu'il reprend à Antoine Danchin[6]. En outre, pour évoquer le rôle de l'informatique dans la modélisation,

---

[1] [Parrochia, D., 1990], p. 225.
[2] [Canguilhem, G., 1963, 1968], p. 313.
[3] Citation de [Bachelard, S., 1979], p. 3 citant elle-même [Canguilhem, G., 1963, 1968], p. 313, citée à son tour intégralement par [Parrochia, D., 1990], p. 219.
[4] [Parrochia, D., 1990], p. 222.
[5] Dans ce passage, après avoir rappelé la teneur des critiques d'Antoine Danchin concernant les usages de l'analogie entre entropie et désordre, Parrochia conclut : « Par conséquent on remarquera que non seulement l'analogie a tendance à diffuser mais qu'elle peut être soumise à des influences d'ordre culturel ou idéologique », *ibid.*, p. 225. Comme on peut le constater, ces analyses sont alors assez proches de celles d'Althusser (1967), Badiou (1969) ou Lecourt (1972). Voir *supra*.
[6] [Danchin, A., 1978], p. 40 : « Cette première phase de la genèse de la connaissance est fondamentale. On commence par expliquer l'inconnu par le connu. » Plus loin encore : « Il y a un modèle pour chaque cas – le modèle part du réel – et la tentation totalitaire de la généralisation est ainsi exclue par construction », *ibid.*, p. 48. On reconnaît bien ici l'épistémologie du perspectivisme pragmatiste et de la dispersion obligée. Egalement : « On se trouve donc aux prises

Daniel Parrochia considère qu'il y a deux informatiques : une informatique de performance essentiellement consacrée au calcul et une informatique de simulation « qui recouvre tout le domaine de l'intelligence artificielle »[1]. Mais dans la suite de ce passage, Daniel Parrochia ne revient que sur le premier type d'informatique, et notamment sur le problème classique que pose l'analyse de données au sujet de la nécessité ou non des hypothèses *a priori*. Pour finir, notre auteur tient à rectifier l'interprétation habituelle des modèles en terme de « métaphores ». Il convient de se persuader selon lui que le modèle « ne se réduit pas à un simple énoncé métaphorique » mais qu'« il constitue bien plutôt un système, un réseau de relations qu'on peut dire, si l'on veut métaphorique, mais en sachant qu'il s'agit d'une métaphore continuée et […] surveillée lorsqu'il s'agit d'un bon modèle »[2]. D'autre part, la métaphore articule du subjectif à de l'objectif alors que le modèle prétend avoir une objectivité. Ce qui permet à Daniel Parrochia de se persuader que cet accroissement de l'objectivité des modèles tient au fait qu'ils sont de plus en plus mathématiques et logiques : il indique par exemple que, grâce aux développements des concepts de l'analyse non standard en mathématiques, essentiellement intervenus dans les années 1960, certaines approches discrétisées ont pu voir le jour, autorisant la « modélisation de certains calculs par ordinateur »[3]. Pour finir, il tient à s'unir à la voix du biologiste Jean-Marie Legay pour lequel le modèle ne doit surtout pas être considéré comme une représentation mais seulement comme un outil de traitement des expérimentations. En ce sens, mais cela ne doit pas nous surprendre, on peut dire que ce qu'il hérite encore, à cette époque, de l'iconoclasme de la philosophie française retrouve ici son point d'accord avec les modélisateurs de l'école de biométrie de l'Université de Lyon[4] : le modèle n'y doit jamais être conçu comme une pure reproduction sinon on se rendrait victime d'une idolâtrie ou d'une idéologie simplificatrice. Il ne doit valoir que par sa fonction et non plus par ce dont il est fait, sa matière. Et cette fonction ne doit être que de schématiser et ne doit désormais rester que formelle ou praxique.

Rappelons ici, par quelques citations, le propos général de Legay. En 1973, par exemple, on pouvait déjà lire ces lignes, au beau milieu de réflexions méthodologiques sur les différents usages des modèles mathématiques :

« Se battre pour comprendre ou créer des structures plus complexes, c'est se battre pour un progrès mental. Dénoncer le modèle-image-de-la-réalité, même auprès de ceux qui ont

---

avec un réel danger qui apparaît chaque fois qu'un nouveau champ de la connaissance s'ouvre à la réflexion cohérente », *ibid.*, p. 49. Signalons enfin qu'à cette date (1978), Antoine Danchin ne considérait la simulation informatique que comme un modèle phénoménologique et « à intention utilitaire », *ibid.*, p. 56.

[1] [Parrochia, D., 1990], p. 228. Cette restriction est, selon nous, très significative. Le rôle de la simulation comme instrument scientifique représentant des objets inertes ou seulement vivants, mais non pas « animés » - doués d'esprit -, semble traditionnellement occulté. C'est surtout la problématique - anthropomorphique et anthropocentriste - de l'intelligence artificielle qui a mobilisé les philosophes s'étant interrogés sur la simulation par ordinateur. Sur ce point, voir les travaux – par ailleurs très clairs et bien informés des débats autour du connexionisme – de Gérard Chazal (1995) (2000), ou même encore *La philosophie des réseaux* de Daniel Parrochia (1993).

[2] [Parrochia, D., 1990], p. 230. Le terme « surveillée » est bien évidemment un emprunt au lexique du *Rationalisme appliqué* de [Bachelard, G., 1949, 1962].

[3] [Parrochia, D., 1990], p. 230.

[4] Voir [Legay, J.-M., 1973], [Legay, J.-M., 1990] et [Legay, J.-M., 1997]. Voir particulièrement [Legay, J.-M., 1973], p. 70 : « Ainsi les modèles fonctionnent comme outils dans la production des connaissances. Le modèle-instrument n'a pas de vertu propre ; un marteau n'est pas habile. » Rappelons que ces premières réflexions conséquentes d'un biologiste français sur les modèles ont été principalement inspirées par Engels, Lénine, Bachelard, Althusser, Lefebvre, Badiou et Lecourt. Voir, pour s'en convaincre, les bibliographies des trois références précédentes. Comme de son côté, la philosophie, avec les mêmes références, mais également, et en parallèle, avec Georges Canguilhem et Suzanne Bachelard, cette dernière mêlant adroitement la philosophie de Bachelard et celle de Husserl (voir [Bachelard, S., 1958]), a interprété les modèles dans le même sens – ainsi que nous l'avons vu -, il ne faut pas du tout s'étonner que l'accord règne encore sur ce point, trois décennies plus tard, entre science et épistémologie.

conscience qu'il s'agit d'une image simplifiée de la réalité, c'est dénoncer un concept primitif et idéaliste, c'est en même temps dénoncer un concept mécaniste. »[1]

Et Jean-Marie Legay ajoutait :

« Même quand cet instrument [le modèle] consiste en une simulation de la réalité, il ne doit à aucun moment être confondu avec la réalité. »[2]

Suivait alors le vieil argument purement logique du « Cratyle » :

« Il y a d'ailleurs là une impossibilité logique. Si un modèle représentait totalement la réalité, il ne saurait s'en distinguer et il n'y aurait plus sujet ni recherche définis. »[3]

Enfin, dans une note de bas de page visant à expliciter ces derniers propos, Legay précisait encore :

« C'est pourquoi une simulation ne peut être considérée comme une expérience, tout au moins au sens de recours à la réalité ; mais la simulation n'est qu'une technique de production de phénomènes ; simuler n'est pas seulement « faire ce qui est avant l'expérience », c'est aussi étudier des mécanismes possibles sur des faits réels. »[4]

Sans nous attarder ici davantage sur les réflexions de Legay puisque nous les avons déjà remises dans leur contexte, retenons que le cantonnement de la simulation à un rôle phénoménologique (imitation des performances de surface, ou heuristique et test de mécanismes hypothétiques), semblait donc bien faire une relative unanimité en cette fin des années 1980, tant du côté des scientifiques que des philosophes.

Or, il nous semble que depuis lors, sur ce point particulier, Daniel Parrochia ait quelque peu modifié ses conceptions. Il n'est que de lire, pour s'en convaincre, le titre de sa récente intervention à l'« Université de tous les savoirs » de l'année 2000 : « L'expérience dans les sciences : modèles et simulation. »[5] Dans cette conférence, notre auteur rappelle tout d'abord que la naissance de la méthode expérimentale en physique, avec Newton, avait été due à un retournement de la méthode hypothético-déductive cartésienne, méthode qui ne laissait que peu de poids à l'expérience, en une méthode davantage inductive et où la théorie se fonde et se construit sur des faits précis et vérifiés sans qu'on n'ait besoin pour cela de « feindre des hypothèses », selon l'expression même de Newton dans son *Optique*. Or, Daniel Parrochia se pose la question, selon nous pertinente, de savoir si, avec l'actuel développement des modèles et des procédés de simulation, on ne serait pas en train de revenir à une forme d'épistémologie cartésienne[6]. Ce nouveau renversement serait dû à la complexification de la mécanique newtonienne au 19ème siècle et à l'apparition de la notion de système physique conditionnant elle-même l'apparition de la notion conjointe de systèmes d'équations. Dès lors, selon Daniel

[1] [Legay, J.-M., 1973], p. 26.
[2] [Legay, J.-M., 1973], p. 26.
[3] [Legay, J.-M., 1973], p. 27.
[4] [Legay, J.-M., 1973], p. 26.
[5] [Parrochia, D., 2000].
[6] [Parrochia, D., 2000], p. 197 : « Qu'est-ce qui a alors amené la science à infléchir à nouveau la méthode expérimentale dans les deux directions anticipées par Descartes : la construction de modèles et la mise en place de simulations ? »

Parrochia, « la notion de modèle n'est pas loin »[1]. Puis revient, dans ses propos, l'argument de l'ouverture de la physique à des domaines non mécaniques explorés à partir de la mécanique. Ainsi le modèle a bien d'abord pour fonction de réduire de « l'encore-énigmatique à du déjà-connu »[2], ce qui lui permet de prendre une part importante dans l'objectif essentiel de la science : intégrer et abréger les savoirs en exportant des méthodes connues et éprouvées dans des domaines et à des échelles jusque là peu accessibles à l'expérience. C'est la raison pour laquelle, le modèle reste tout de même essentiellement un « instrument d'intelligibilité »[3]. C'est un instrument de réduction, de délégation de l'expérience, mais toujours en vue de l'intelligibilité. En biologie et en médecine également, au début de la mise en œuvre de la méthode expérimentale par Claude Bernard, on privilégiait encore l'approche analytique qui morcelait les phénomènes afin de déceler des causalités simples. Par la suite, avec la prise en compte du « caractère interrelié des phénomènes de la vie », de concrets qu'ils furent d'abord, et d'emploi seulement réservé à l'anatomie, les modèles sont progressivement devenus mathématiques et appliqués à la physiologie et au métabolisme[4].

En résumé, la modélisation, pour Daniel Parrochia, intervient surtout au niveau de l'intelligibilité des phénomènes. Ses fonctions sont donc essentiellement de nature intellectuelle[5]. Dans cette interprétation épistémologique, il devient alors naturel de s'inquiéter du maintien de la conformité de cette représentation, empruntée au départ à un autre domaine, à l'expérience. Or, de façon significative, c'est à la simulation que ce rôle est tout naturellement assigné, selon notre auteur[6]. Il définit la simulation de la façon suivante : « cette capacité à reproduire numériquement et à générer de façon figurative et imagée des situations, des séquences, des processus identiques aux processus réels. »[7] Informé de la distinction que fait le physicien Etienne Guyon entre modélisation et simulation[8], Daniel Parrochia convient du fait que le modèle simplifie le phénomène visé, alors que la simulation tend à conserver « tous les paramètres du problème initial »[9]. À le lire, on sent alors qu'il pourrait entrevoir là les potentialités d'expérimentation (bien actualisées aujourd'hui dans les autres sciences que la physique) propres à la simulation, étant donné la capacité de cette technique à dupliquer le réel jusque dans ses linéaments les plus intriqués. Il y aurait donc là matière à percevoir une évolution chez notre auteur par rapport à la conférence de 1990. Mais, sous une forme qui tranche avec les propos qui précèdent, Daniel

[1] [Parrochia, D., 2000], p. 197.
[2] [Parrochia, D., 2000], p. 197.
[3] [Parrochia, D., 2000], p. 197.
[4] [Parrochia, D., 2000], pp. 198-199.
[5] [Parrochia, D., 2000], p. 199 : « Dans ces deux exemples [mécanisme cybernétique de Monod, Jacob, Lwoff et modèle de régulation hormonale de Bernhard-Weil], des situations dialectiques complexes ne deviennent *intelligibles* que par une modélisation. » C'est nous qui soulignons.
[6] [Parrochia, D., 2000], p. 199.
[7] [Parrochia, D., 2000], p. 200.
[8] In [Guyon, E., 1996, 1997], p. 109. Il faut noter que, dans ce texte précis, Etienne Guyon garde surtout à l'esprit les usages de la simulation qu'il pratique en physique et qui conservent essentiellement à la simulation informatique son rôle de simulation numérique – qu'il appelle d'ailleurs « expérience numérique » -, en conformité avec son origine historique remontant aux années 1940, plus exactement, en conformité avec l'interprétation française des simulations numériques à la von Neumann-Ulam, interprétation qui veut voir en elles de simples calculs numériques. La simulation y est donc considérée comme un calcul particulier, une résolution numérique du modèle, une simple instanciation de ce modèle. C'est pourquoi Etienne Guyon ne cache pas sa préférence pour la modélisation et il peut ainsi écrire que la différence de complexité entre modèle et simulation « permet de donner une plus grande marge de manœuvre à la modélisation qu'à la simulation », *ibid.*, p. 109. Plus loin, il ajoute : « En ce sens, l'expérience modèle [qui simplifie, filtre le réel en vue d'un objectif et fait donc intervenir le 'génie' du scientifique – pp. 110-111], qui est souvent doublée d'expériences numériques sur le même système, me semble avoir un plus grand degré d'autonomie que ces dernières parce qu'elle possède justement des degrés de liberté contingents à l'expérience modèle et non introduits par l'expérimentateur », *ibid.*, p. 124. Le modèle reste la formule générale de ce qui en reste un calcul particulier (la simulation), donc la simulation est dérivée du modèle et est de moindre valeur épistémique.
[9] [Parrochia, D., 2000], p. 200.

Parrochia nous semble reculer encore devant cette éventualité épistémologique ; il indique tout de suite que le sentiment de réalité qu'éprouve le pilote qui se trouve dans un simulateur de vol est « trompeur car le simulateur est un modèle réduit, une simplification de la réalité, restreinte à un poste de pilotage monté sur un système de vérins hydrauliques ». En vertu du principe scolastique, implicite dans le texte, selon lequel la cause est plus parfaite et plus riche en réalité que son effet, et en vertu de la prémisse mineure, qui nous paraît précisément contestable, selon laquelle « la simulation présuppose […] la modélisation »[1], il lui paraît évident de conclure que la simulation elle-même est un modèle réduit et vaut donc moins que le modèle mathématique. C'est donc un modèle (mathématique) réduit.

Dans la suite, Daniel Parrochia s'émancipe pourtant imperceptiblement de cette lecture puisqu'il va considérer la simulation comme une réplication réaliste des seuls effets accessibles à la représentation humaine[2], comme une imitation des performances seules, conformément à l'interprétation réductrice de Canguilhem[3] que nous avons présentée plus haut. Or, comme plusieurs causes peuvent avoir le même effet, on peut choisir les causes les plus économiques pour se représenter un effet choisi. Dès lors, et moyennant ce déplacement subreptice, Daniel Parrochia peut faire, en toute justice, une place très large au rôle empirique de la simulation informatique : « La simulation permet d'effectuer des tests et d'expérimenter sans danger »[4], à moindres coûts donc. Il nous semble alors qu'il rompt à nouveau avec les propos selon lesquels un modèle n'aurait d'impact direct qu'intellectuel, dans tout usage scientifique, y compris de simulation. Il n'en est rien en fait car, dans la suite immédiate de son intervention, il tient à classer la simulation numérique des modèles mathématiques de la météorologie dans ce type de simulations phénoménologiques. Cette évocation des modèles météorologiques lui permet d'affirmer que le modèle numérique devient en l'espèce un « laboratoire virtuel »[5]. La simulation informatique restant alors pour lui une imitation des effets de surface, c'est l'occasion de rappeler que, dans le domaine de l'intelligence artificielle, les chercheurs « ont dû se limiter à *reconstituer* des comportements intelligents » au lieu de « *comprendre* la nature de l'intelligence »[6].

La simulation est donc par nature imparfaite pour Daniel Parrochia[7], car il la juge toujours implicitement à l'aune d'une intellection idéale. C''est sans doute pourquoi il hésite encore à penser jusqu'au bout ce que cela signifie pour elle de passer pour une expérience effective, possibilité qu'il a pourtant évoquée, comme en passant. Dans la fin de son intervention, est alors rappelée l'idée plus commune, déjà présente chez Philippe Quéau, par exemple, selon laquelle la

---

[1] [Parrochia, D., 2000], p. 200.

[2] On le voit maintenant, cette fluctuation dans la caractérisation de la simulation lui vient de la définition qu'il s'en donne et que nous avons rappelée plus haut. Qu'entend-il exactement en effet par « des processus identiques aux processus réels » ? La précision manque sur ce point. Il lui est donc possible de passer imperceptiblement de l'évocation de la simulation numérique à celle d'une simulation informatique considérée d'un point de vue plus « phénoménologique », au sens non-philosophique de ce terme.

[3] Caractérisation exprimée semblablement par [Couffignal, L., 1963], [Sauvan, J., 1966], [Legay, J.-M., 1973] puis [Legay, J.-M., 1997].

[4] [Parrochia, D., 2000], p. 200.

[5] [Parrochia, D., 2000], p. 200.

[6] [Parrochia, D., 2000], p. 201. C'est l'auteur qui souligne.

[7] Au sujet du programme de l'intelligence artificielle, il produit le commentaire suivant : « Il y a un triple affaiblissement du projet initial puisque que [reconstituer au lieu de comprendre] c'est avouer que non seulement on ne connaîtra pas la nature de l'intelligence, non seulement le simulacre ne renversera pas le modèle et la copie, mais la copie restera une copie imparfaite et qui n'égalera pas le modèle humain. Cette évolution, qui sonne une sorte de retour à Platon, et va donc d'une modélisation impossible à une simulation imparfaite, aurait pu, à bon droit, passer pour une régression aliénante. Or selon Philippe Quéau, ce chemin apparaît au contraire libérateur [...] », [Parrochia, D., 2000], p. 201. Dans la suite est résumée l'idée de Quéau selon laquelle la créativité vient de la distance entre modèle et réalité, comme dans la logique du rêve où la créativité s'exprime le mieux par des déplacements et des condensations – ces termes étant pris au sens de l'interprétation des rêves conçue par Freud.

chance de la simulation est de nous livrer, grâce à ses imperfections mêmes, à un univers de mondes différents, dont le nôtre n'est qu'un des possibles.

Au sujet de l'empiricité de la simulation, Daniel Parrochia s'inquiète enfin de ce qu'il appelle un « rationalisme fantasmé »[1] qu'il oppose au « rationalisme appliqué » décrit et prôné en son temps par Gaston Bachelard, car, selon lui, « la simulation informatique fait perdre son empiricité à l'expérience et tend à la réinstaller au sein du théorique ». Autrement dit, la simulation n'aurait pas exactement pour conséquence d'approfondir et d'élargir notre accès à l'empirie du réel, mais, au contraire à la supprimer pour la remplacer par de pures considérations théoriques voire fantasmatiques. Or, on le voit, c'est bien parce que notre auteur préfère concevoir la simulation comme une modalité théorique et plus largement comme une modalité symbolique et langagière, qu'il s'inquiète d'une telle substitution. La bipolarité autorisant la dialectique traditionnelle théorie/expérience en science lui semble en conséquence menacée, surtout lorsqu'il s'enquiert des usages de la simulation dans les domaines de la créativité tels que ceux dont se préoccupent Philippe Quéau et l'INA. Toutefois, il concède qu'à travers ces simulations qui reformulent et enrichissent le réel[2], « expériences et applications sont moins réfutées que réduites à un support minimum, le symbolique remplaçant économiquement le matériel »[3]. La simulation permettrait donc de faire passer le modèle d'une représentation condensée à une représentation amplifiante du réel. Mais, selon Daniel Parrochia, cette amplification elle-même sera toujours quand même débordée par le réel, d'une façon qui reste d'ailleurs énigmatique dans son texte, puisque non élucidée. Ici, l'auteur ne nous semble pas convaincu par l'importance des arguments mathématiques de von Neumann (1951) constatant la supériorité d'une modélisation intégralement numérique sur tout autre approche du réel, à commencer par la modélisation analogique et jusqu'à l'expérimentation réelle. En effet, dans un modèle numérique, nous gardons toujours en droit la possibilité de contrôler la précision des variables et des paramètres, alors que, du fait des mesures et de la complexification croissante des expérimentations sur le réel, complexification due elle-même à la croissance de la connaissance que nous en avons, le recours direct à des expérimentations réelles semblera de moins en moins pertinent, comme cela a été précédemment le cas pour les modèles analogiques. On pourrait résumer cet argument en disant que *le réel n'est pas un bon modèle de lui-même*. Il ne fournit pas même le meilleur substrat d'expérimentation. Car, à cause de son caractère (apparemment) analogique, il ne fournit pas de situations réelles ni de modèles suffisamment contrôlables de ses propres phénomènes. Pour von Neumann, il faut pallier cette limitation du contrôle par le recours à des fictions complexifiées et numérisées : les simulations. C'est donc le progrès de la connaissance et, avec lui, la complexification du *contrôle*, de l'*instrumentation* et de la *métrologie* dans les expériences qui nécessitent de numériser et donc de virtualiser les expériences, pas seulement le caractère concrètement inaccessible de leur seul *substrat*. En dépit de cela, il demeure évident, pour Daniel Parrochia, que les simulations d'explosions nucléaires devront toujours se doubler d'un recours à des « expériences réelles coûteuses », ce qui nous paraît, pour le moins, discutable.

Suit alors un dernier paragraphe dont le contenu s'inquiète des dangers de la virtualisation. L'auteur y exprime malgré tout sa confiance. Mais une forme d'iconoclasme y perce encore :

« La simulation moderne suscite des mondes virtuels dont la logique, qui tient parfois du rêve, pourrait se révéler celle du cauchemar si elle se déconnectait totalement de l'expérience

[1] [Parrochia, D., 2000], p. 202.
[2] Il cite alors [Granger, G.-G., 1995], p. 9.
[3] [Parrochia, D., 2000], p. 202.

sensible et si la matière symbolique devait définitivement remplacer la matière réelle. Mais nous n'en sommes pas là et le recours au sensible, aux infrastructures matérielles et aux coûts réels nous remet périodiquement, malgré l'excroissance surréaliste que nous avons créée, dans une perspective de rationalisme appliqué. »[1]

Finalement, tout en acceptant cette fois-ci l'existence d'un statut empirique propre à certaines simulations, ce texte reste, au total, dans une sorte d'entre-deux. Même s'il en imagine la possibilité, il ne s'autorise pas à concevoir ce qui fait l'empiricité si particulière de la simulation informatique ; il oscille ainsi entre une réduction de la simulation au modèle simplifiant et une interprétation de cette même simulation comme imitation de surface. Mais comment une simple imitation de surface peut-elle donner lieu à des substituts d'expériences réelles qui ne soient pas toujours de purs fantasmes ? Comment se fait-il que, *parfois*, ces fantasmes soient de bons substituts du réel ? Sur quoi porte exactement cette substitution, une fois qu'on l'a admise ? Sur quoi fait-on précisément porter l'expérimentation virtuelle ? Qu'y apprend-on ? À toutes ces questions, point de réponses précises. Selon nous, l'auteur préfère conserver, dans ce texte, un type d'iconoclasme résiduel qui prend la forme d'une critique du fantasme, terme emprunté à la psychanalyse, ce qui lui permet de s'inscrire encore dans la lignée de Bachelard et de son projet d'une psychanalyse de la connaissance objective. Sous cette dernière forme, le déplacement de l'iconoclasme s'autorise de nos classiques peurs à l'égard de la « folle du logis » qu'est l'imagination, dont on craint toujours qu'elle prenne tout pouvoir sur la raison. Puisque la simulation n'est qu'une affaire entre ce qu'on *dit* du monde et ce qu'on *se dit* à part soi, entre l'esprit et l'esprit donc, on craint toujours que l'esprit se monte la tête, si l'on peut dire.

Bruno Latour et la nature « inscriptive » des modèles

Le philosophe et sociologue Bruno Latour n'a pas spécifiquement travaillé sur les modèles et les simulations dans la science contemporaine. Mais les quelques occurrences de ces termes dans son œuvre[2] montrent que de telles pratiques ne viennent, selon lui, que confirmer sa conception générale de la « construction des faits scientifiques »[3]. Selon lui, il n'y aurait donc guère de réels changements dans la pratique de la science qui soient intervenus avec l'émergence des modèles. Comme ce point de vue nivelle considérablement ce qui nous paraît au contraire se manifester singulièrement dans cette histoire récente, et qu'il tend même à supprimer la pertinence qu'il y aurait à en tenter une ressaisie compréhensive et différenciée, nous ne pouvons faire l'économie d'une analyse de cette philosophie, cela afin de voir si sa conception des modèles menace véritablement notre approche.

Il faut tout d'abord rappeler qu'à la lumière de ses premiers travaux d'anthropologie, la totalité de la pratique scientifique est rapidement apparue à Bruno Latour comme de nature « inscriptive » ou plus généralement langagière ou encore communicationnelle. La matérialité d'un laboratoire peut être ainsi entièrement ressaisie dans la « configuration particulière de ses inscripteurs »[4]. Le

[1] [Parrochia, D., 2000], p. 203.
[2] Voir [Latour, B., 1989, 1995], pp. 569-606.
[3] Il nous paraît significatif que le terme anglais « *production* » ait été traduit par « construction » dans le sous-titre de son ouvrage de (1979, 1988) : « La vie de laboratoire – La construction des faits scientifiques ». Le terme de « production », trop connoté par ses usages tous azimuts dans le matérialisme dialectique français, naguère triomphant mais déclinant, en cette fin des années 1980, aurait eu l'inconvénient de placer d'emblée cet ouvrage dans une vision dépassée, et fortement refoulée par le lectorat français d'alors.
[4] [Latour, B., Woolgar, S., 1979, 1988], p. 58. Le terme « inscripteur » désigne tous types d'appareils, d'instruments, de pratiques ou de structures dont le fonctionnement donne finalement toujours naissance à des traces écrites,

fait que l'on croit par la suite avoir mis en évidence certaines propriétés matérielles ou objectives d'une réalité naturelle subsistant de façon autonome n'est lui-même que le produit mythique, utile mais mystifiant, de la stratégie rhétorique générale à laquelle peut se réduire l'activité scientifique[1]. La totalité de la pratique scientifique se résume donc bien à une série d'opérations stratégiques et rhétoriques sur les énoncés : « ajout de modalités, citation, amélioration, diminution, emprunt, proposition de combinaisons nouvelles »[2]. Les « idées » des scientifiques elles-mêmes « résultent d'une forme particulière de présentation et de simplification de toute une série de conditions matérielles et collectives »[3]. Suit alors, en bas de page, une note reconnaissant l'emprunt de cette « idée » à la thèse de Nietzsche[4] concernant la vérité scientifique. Arrêtons-nous un moment sur cette référence dont nous allons voir qu'elle est plus importante, pour la compréhension de toute son œuvre, que ce que son auteur veut bien reconnaître. N'oublions pas en effet que sa formation initiale fut d'abord essentiellement philosophique. Il sait donc précisément de quoi il retourne lorsqu'il évoque comme en passant le nom de Nietzsche[5]. Bruno Latour écrit exactement en bas de cette page 172 : « La notion d'idée comprise comme résumé d'une série de circonstances qui conforterait la croyance en l'existence d'un moi pensant, doit beaucoup à la façon dont Nietzsche traite de la vérité scientifique. »

En quoi consiste donc la doctrine nietzschéenne de la vérité ? Rappelons-là en quelques mots. À partir d'une attention de principe quasi exclusive aux rapports conflictuels entre hommes, notamment depuis *Humain, trop humain* (1878), les « vérités » apparaissent à Nietzsche comme « les erreurs irréfutables de l'homme »[6]. Ce serait donc « un préjugé moral de croire que la vérité a plus de valeur que l'apparence »[7]. La naissance de la croyance en la vérité et du goût que les hommes ont pour elle serait donc à rapporter à la généalogie de la morale elle-même. La volonté

---

communicables, à des inscriptions visant à persuader ou à remontrer – ce dernier terme étant pris ici dans son vieux sens de « représenter la vérité ou la crédibilité de quelque énoncé à quelqu'un ».

[1] « On assiste alors à la transformation de ce qui n'est que le simple résultat d'une inscription en un objet qui colle à la mythologie en vigueur », [Latour, B., Woolgar, S., 1979, 1988], p. 58. « On a bel et bien construit, à l'aide des inscripteurs une réalité artificielle, dont les acteurs parlent comme d'une entité objective », *ibid.*, p. 59.

[2] [Latour, B., Woolgar, S., 1979, 1988], p. 87.

[3] [Latour, B., Woolgar, S., 1979, 1988], p. 172.

[4] Deux autres occurrences de Nietzsche existent dans [Latour, B., Woolgar, S., 1979, 1988]. La première, allusive, permet de faire comprendre aux philosophes qui le lisent que son expérience en laboratoire, si éprouvante d'un point de vue émotif, lui commandait de renoncer successivement à l'optimisme rationaliste de Hegel puis à celui de Leibniz, pour épouser définitivement le nietzschéisme : « Le rouge de leur sang et le blanc de leur peau [des rats de laboratoire] sont également aveuglants sous la lumière crue des projecteurs. Je ne savais plus si ce réel était rationnel et si ces hécatombes étaient en vue du meilleur des mondes possibles. Nietzsche m'avait appris à poser cette question : qui dira la cruauté d'un homme qui ne veut pas être trompé ? Qui dira la cruauté d'un homme qui ne veut pas se tromper ? », *ibid.*, p. 13. La troisième occurrence, la deuxième étant la note de la page 172 que nous citons, apparaît en conclusion de l'ouvrage, en note également, à la page 280 : « Il semble que le prototype de base de l'activité scientifique soit à trouver non pas dans le domaine des mathématiques et de la logique, mais, comme l'ont dit, à plusieurs reprises Nietzsche et Spinoza, dans le travail d'exégèse. L'exégèse et l'herméneutique sont les outils autour desquels l'idée de production scientifique à été historiquement forgée [est insérée ici une référence à *La grammatologie* de Derrida (1967)]. Nous *affirmons* que nos observations empiriques de l'activité du laboratoire s'accordent *parfaitement* avec ce point de vue [sont insérées ici une référence au n°spécial de « Culture technique », 14 : « Les 'vues' de l'esprit », dirigée par Latour et de Noblet, 1985 et une référence à *La raison graphique* de Jack Goody, 1979]. » C'est nous qui soulignons. Il est pour le moins surprenant qu'une description philosophique produite par des philosophes d'il y a un ou trois siècles, ou bien encore contemporains mais tout à fait ignorants de la science contemporaine, « s'accorde parfaitement » avec cette même science. On peut donc soupçonner ici à juste titre la simple confirmation d'un *a priori* nietzschéen en fait constamment régulateur dans le travail de Latour, plutôt qu'un réel et déraisonnable accord à travers les siècles.

[5] Il est étonnant que l'ouvrage plus philosophique et plus récent de 1991, *Nous n'avons jamais été modernes*, ne cite pratiquement jamais Nietzsche, sauf, en passant, pp. 90 et 100, et ne l'inclut même pas dans sa bibliographie. Latour semble ainsi vouloir nous barrer le chemin du retour à la généalogie de sa propre pensée. Sur la stratégie du chemin barré comme essentielle à la résistance d'une idée aux critiques, voir Latour lui-même, *infra*. Nous considérons que ce *lapsus* « calculé » est très révélateur, comme cela se confirmera plus bas.

[6] In *Le gai savoir*, 1882-1886, § 265, [Nietzsche, F., 1993, Tome II], p. 163 : « *Dernier scepticisme.* – Que sont en dernière analyse les vérités de l'homme ? – Ce sont les erreur irréfutables de l'homme. »

[7] In « Par-delà le bien et le mal », 1886, II, §34, [Nietzsche, F., 1993, Tome II], p. 590.

de vérité reposerait sur la morale. Or la morale est une invention concertée des hommes faibles, ou de la faiblesse des hommes si l'on préfère, et dont l'objectif est de servir à contrecarrer les puissants et les forts par le recours aux valeurs et à la culpabilisation. À l'origine de la généalogie de la morale, les faibles ont réussi à faire croire aux forts qu'il y avait un Bien et un Mal, qu'il y avait de l'Etre et du Vrai, et ainsi ils ont pu leur résister. L'union a donc fait la force des faibles, elle a institué des valeurs fictives, construites socialement, auxquelles les faibles eux-mêmes, dans leur faiblesse, finissent par croire ; elle a contribué enfin à développer, de façon donc seconde là aussi, la conscience personnelle de chaque homme. La conscience de soi personnelle, cette prétendue intériorité, ne serait donc que le résultat accidentel du besoin de communication qui serait lui-même né de la seule faiblesse du corps de l'homme et de cette nécessaire et humiliante concertation moralisante et visant à la construction d'un accord autour d'une morale, d'une religion et de « représentations » communes, c'est-à-dire autour d'une « vérité » originellement sans objet. C'est pourquoi la volonté de vérité est à la fois d'origine philosophique, avec Platon, et chrétienne, avec l'invention de la culpabilité et de l'explication de la souffrance des faibles par le prétendu péché[1].

Nous avons donc là affaire à une vision clairement agonistique[2] et linguisticiste[3] de la vérité : la vérité est née d'un conflit, elle ne subsiste que dans des signes que l'on se communique, et ce, même à part soi, dans cette prétendue conscience personnelle où l'on peut se persuader soi-même de la valeur de quelque énoncé que l'on se dise. On ne pense pas : on se dit à part soi, on se parle à soi-même, c'est tout. Non pas « je pense » *cogito*, mais « je me dis que je pense ». La vérité que l'on ressent en soi, dans la soi-disant profondeur ou intimité de son for intérieur mais qui n'est en fait que de surface, n'est donc que l'effet superficiel d'une auto-persuasion rhétorique. Quand nous disons que nous « connaissons » la vérité, c'est que nous avons perdu : nous avons cédé, en nous-même, dans notre discours intérieur (car il n'y a, à l'« intérieur », que du discours), aux obligations de la coalition des faibles qui nous entourent. La vérité n'est donc que le discours qui résiste aux attaques qui ont tendance à l'abattre. Mais tout discours en lui-même ne peut, par nature, aucunement être « vrai » en fait, puisqu'il s'agit là d'une valeur, d'un idéal inventé. Seules la vie, l'action et la force immédiate témoignent d'une réalité. Le discours de vérité lui-même, en tant que discours, est né d'un mensonge, d'un ratage premier de cette réalité seule essentielle qu'il faudrait, qu'il aurait fallu, vivre pleinement.

---

[1] Voir « La généalogie de la morale », 1887, III, §§ 27-28, [Nietzsche, F., 1993, Tome II], pp. 886-889 .

[2] Indiquons pour finir que cette vision agonistique a elle-même son soubassement dans la doctrine de la volonté de puissance dont serait animé tout homme. Il nous serait trop long et peu utile de le montrer. Qu'il nous suffise de l'avoir signalé.

[3] Si nous insistons tant sur cette option linguisticiste inaperçue, mais bien à l'œuvre dans tant de théories de la connaissance et d'épistémologies depuis Kant – dialecticisme, logicisme, structuralisme et sociologisme -, c'est que nous voulons y voir la forme contemporaine d'un anthropomorphisme proche parent – simplement déplacé de la science dans la philosophie des sciences - de celui d'Aristote dont l'époque moderne, le 17ème siècle, s'était pourtant tant gaussé. En effet, si l'on ne peut encore penser le rapport cognitif que nous entretenons avec le monde et avec les choses que sur le seul modèle de notre rapport aux hommes, dans un horizon ou communicationnel ou conflictuel donc, il y a fort à parier que la raison épistémologique peut, sans crainte, croire qu'elle n'en est qu'à son enfance, à l'instar de la physique d'Aristote. Sur ce point, le revirement du dernier Granger, inspiré justement entre autres par une méditation incessante sur Aristote, devrait pouvoir nous faire réfléchir un peu sur l'éventuelle mais souhaitable entrée dans l'adolescence de la raison épistémologique. Le retour du « réalisme » dans la philosophie anglo-américaine des dernières décennies est aussi une conséquence de cet épuisement du linguisticisme (voir également le dernier Bouveresse). Mais cette philosophie de la connaissance reste une forme critique amoindrie et encore fortement teintée de pragmatisme linguisticiste : elle opère essentiellement une critique des représentations et des théories des « *sense-data* ». Les actuels farouches tenants de l'extériorisme en France quant à eux – dont François Dagognet - se rendent encore inconsciemment victimes d'un fort anthropomorphisme lorsqu'il ne veulent voir toute science ou tout savoir que comme un langage, une écriture circulant entre hommes, entre les hommes et les choses, ou entre soi et soi-même.

À côté du pathos très ambigu de cette doctrine, on reconnaît en revanche la thématique, très classique au 19ème siècle, du ratage premier et tragiquement nécessaire de l'essence ou de la réalité, éperdument visée pourtant à travers toute conscience humaine[1]. Et c'est le langage ici qui est, comme chez Hegel, la marque d'une médiation nécessaire et irréductible. Nous voyons maintenant qu'il y a lieu de penser que la philosophie sociologiste de Bruno Latour est bien une manifestation extrême de ce que nous avons appelé l'option largement linguisticiste de l'épistémologie française. Sa seule spécificité tient à son influence plutôt nietzschéenne[2] qu'hégélienne. Ce qui d'ailleurs explique son caractère extrême et volontiers combatif, puisque justement, selon une telle doctrine, la vérité ne subsiste pas à part soi mais se décide dans le débat et le conflit[3]. Ce résistivisme ontologique de principe, qui justifie le fait que nous classions Latour parmi les philosophes, voire parmi les ontologistes[4], s'exprime donc clairement de la façon suivante : n'existe dans le discours et ne mérite d'être rapporté que ce qui résiste aux autres discours ou dispositifs de persuasion. On le voit, la sociologie des sciences de Latour découle à peu près totalement de ce principe ontologique[5].

Il ne nous revient pas de discuter ici de l'intérêt général des thèses nietzschéennes. Simplement, après avoir caractérisé cette philosophie[6] et ses soubassements ontologiques et épistémologiques, interrogeons-nous sur la façon dont Latour lui-même l'applique à la question

---

[1] Il est significatif que Bruno Latour ne voit pratiquement que cela dans l'apport kantien. Il ne présente cette philosophie que comme une doctrine de l'éloignement de l'être, du désenchantement humain, en oubliant qu'il y a aussi chez Kant une doctrine de l'intuition, certes non intellectuelle, c'est-à-dire - pour faire bref - non cartésienne, mais dont on devrait quand même, selon nous, se préoccuper, surtout quand on travaille sur la mise en œuvre des savoirs et des pratiques de science. Voir la page 76 - philosophiquement très réductrice à ce sujet - de [Latour, B., 1991, 1997].

[2] Il reconnaît d'ailleurs cet héritage nietzschéen dans l'entretien qu'il a eu avec François Dosse : voir [Dosse, F., 1995, 1997], pp. 126-126.

[3] C'est bien ce que Michel Serres reproche constamment à Bruno Latour dans [Serres, M., Latour, B., 1992]. Pour Serres, la science, à la rigueur, peut se réduire à cette agonistique communicationnelle, car l'idée latourienne est sur ce point très proche de celles qu'il défendait naguère – voir ici *supra* -, mais il refuse de nier toute existence à la création pure et solitaire de l'esprit propre aux arts et à la philosophie. C'est en ce sens qu'il reste leibnizien sans devenir nietzschéen.

[4] Il y a en effet une sorte d'ontologie relationniste convaincue et tranquille qui s'exprime à travers des phrases comme celles-ci : « La plupart des difficultés pour comprendre la science et la technique viennent du fait que nous croyons en l'existence de l'espace et du temps comme un cadre de référence *à l'intérieur duquel* les événements et les lieux prendraient place. », [Latour, B., 1989, 1995], p. 548. Plus loin, on trouve une métaphysique improvisée : « L'espace est constitué par des déplacements réversibles, le temps par des déplacements irréversibles. Comme tout dépend du fait de déplacer des éléments, chaque invention d'un mobile immuable va dessiner un espace-temps différent », *ibid.*, pp. 551-552. Certes, nous savons combien l'auteur doit ici aux invariants circulationnels et aux temps et espaces topologiquement feuilletés de Michel Serres, mais du moins ce dernier n'en a-t-il pas conçu une application directe et susceptible d'expliquer d'une façon purement idéaliste la construction de la science.

[5] Il n'y a pas jusqu'à la théorie de l'oubli de la construction sociale des faits scientifiques qui ne doive aussi intégralement son principe à Nietzsche lui-même : « *Nous n'affirmons pas seulement que les faits sont socialement construits. Nous voulons montrer également que le processus de construction met en jeu l'utilisation de certains dispositifs* par lesquels toute trace de leur production est rendue extrêmement difficile à détecter », [Latour, B., Woolgar, S., 1979, 1988], p. 180. C'est l'auteur qui souligne en italique. C'est ce qui n'est pas souligné par lui que nous soulignons en revanche : à en croire notre auteur donc, le chemin du retour à la généalogie sociologique des faits scientifiques serait barré. Si les faits commencent à nous résister sur le mode de l'être et non plus du discours, c'est parce qu'ils n'existent pas ! En effet, cette inversion/perversion ferait partie de la stratégie des modernes pour continuer à nous faire croire que ces faits ne sont pas construits mais préexistent : « il se produit par conséquent une inversion : l'objet devient la raison pour laquelle l'énoncé a été formulé à l'origine. » Le chemin du retour est barré, sauf apparemment pour Latour, comme ce fut miraculeusement le cas aussi pour Nietzsche, ce visionnaire philologue qui tâchait de nous persuader que la vérité avait été construite et qu'il avait été malheureusement l'un des seuls à voir comment. En effet, pour réparer l'oubli de la véritable généalogie de la morale, Nietzsche procédait lui aussi déjà à une analyse des traces langagières, des inscriptions : il recourait à l'étymologie et à la philologie. Voir *La généalogie de la morale*, 1887, I, §4, [Nietzsche, F., 1993, Tome II], pp. 780-781. L'argument poppérien classique de la non-réfutabilité guette cependant une telle sociologie, on le voit. Mais selon le principe nietzschéen et latourien déjà cité, une « erreur irréfutable » est une « vérité » ! Donc le problème est réglé. Tout ceci est quand même très paradoxal pour une philosophie qui conçoit par ailleurs la science comme une construction communicationnelle, dialoguée/dialectique et intersubjective.

[6] Cette dénomination serait certainement récusée par Latour. Mais rappelons que c'était justement aussi le cas de Nietzsche, puisque, dans sa doctrine, les « philosophes » sont assimilés aux prêtres de la religion de la vérité.

des modèles et des simulations en science. Il part du principe que l'espace et le temps eux-mêmes sont construits et que les seuls invariants relatifs d'un domaine donné de la science sont les réseaux. Ils servent à « mobiliser, cumuler et recombiner le monde »[1]. Selon cette lecture rhétorique de la « mobilisation » interactive et recombinante à quoi se résume la fonction de toute expérimentation comme de tout calcul dans toutes les sciences, le « modèle réduit », par exemple le modèle analogique en hydrodynamique[2], joue simplement le rôle de réducteur de problème. Il présente en effet l'essentielle qualité d'être réduit, c'est-à-dire d'être facilement mobilisable et mobilisé par l'activité des hommes dédiés à ce genre de tâches. Seules les dimensions ont été transférées ou réduites de sorte que cette mobilisation de l'artefact est plus aisée que celle de l'original. Tout n'est donc qu'un problème de « domination » et de « maîtrise »[3] de la situation. Il faut se rallier la nature, la mettre de son côté, sans quoi la mobilisation aurait été stérile, les défaitistes ou les défections ayant été trop nombreux pour être contenus par la force des inscriptions dans un réseau fonctionnel. Les modèles sont donc des réseaux mobilisateurs de « choses »[4] et d'acteurs humains, comme on le voit aisément pour le modèle analogique précédent. Et Latour d'étendre cette lecture aux nombres eux-mêmes : ils sont aussi essentiellement des organes mobilisateurs en ce qu'ils se réduisent à la fonction d'additionner, c'est-à-dire de synthétiser, totaliser. Si, par exemple, un institut de démographie compte des bébés, le nombre n'existe pas ici autrement que comme moyen de relation entre les « bébés qui pleurent » et l'« institut de démographie »[5]. Par extension, tout calcul ou toute manipulation sur des symboles ne devient qu'une stratégie parmi d'autres de mobilisations réductrices des acteurs-choses au profit des acteurs-hommes. Le pouvoir de représentation se réduit en fait à un pouvoir de mobilisation en vue d'un faire, d'un agir. La variance des statisticiens permet ainsi de dire le plus avec le moins, de réduire pour dominer. Et là, une référence explicite est enfin faite[6] à François Dagognet (1984) et à sa théorie de la représentation-condensation. Les formules mathématiques ne sont que des liants qui rassemblent et « redistribuent les connexions entre éléments »[7]. Deux phrases résument bien ce que nous avons dit :

« Une équation n'est pas différente par nature de tous les autres outils qui permettent de réunir des éléments, de les mobiliser, de les organiser et de les représenter ; elle ne diffère pas d'un tableau, d'un questionnaire, d'une liste, d'un graphique, d'une collection ; elle constitue simplement, en tant que point ultime d'une longue cascade, un moyen d'accélérer encore un peu plus la mobilité et la combinabilité des traces ; les équations sont une des nombreuses catégories de traductions, et c'est à la suite de toutes les autres traductions qu'elles doivent être étudiées. Deuxièmement, elle ne peut être détachée de l'ensemble du processus de construction du réseau, dont elle représente une minuscule partie […] »[8]

Cette philosophie sociologiste présente pour nous l'inconvénient d'être totalement nivelante ; elle écrase les distinctions épistémologiques, en les déclarant nulles et non avenues, distinctions

[1] [Latour, B., 1989, 1995], p. 548.
[2] [Latour, B., 1989, 1995], p. 554.
[3] [Latour, B., 1989, 1995], p. 555. Inutile d'insister sur l'*a priori* agonistique dont nous avons déjà parlé et qui affleure ici à toutes les lignes, comme on le voit.
[4] Les « choses » sont des acteurs : elles sont homogènes aux acteurs humains. Voir les propos tenus à propos du microbe pasteurien *in* [Latour, B., 1989, 1997], p. 658 : « le micro-organisme est un acteur en voie de définition… »
[5] [Latour, B., 1989, 1995], p. 562.
[6] [Latour, B., 1989, 1995], p. 571.
[7] [Latour, B., 1989, 1995], p. 573.
[8] [Latour, B., 1989, 1995], p. 574.

auxquelles on est contraint lorsque l'on réfléchit un peu sur l'histoire des différents modes de conceptualisation. Qu'on y songe : à ce compte-là, l'histoire des sciences et des techniques est une imposture pure et simple. Que tirer de toute cette entreprise confusionnante bien plus qu'éclairante ? Cette philosophie d'ensemble ne donne aucun moyen conceptuel de distinguer entre les divers modes de représentation, de calculs, de modélisation et de simulation. Néanmoins, elle nous rappelle de façon stimulante le rôle croissant des intervenants et des acteurs dans nombre de travaux scientifiques. Comme entreprise sceptique radicale, elle nous permet de comprendre et d'accepter la modestie des modèles en ce qu'ils n'ont plus la prétention de dire la vérité ou de théoriser le monde.

Bernard Feltz et Isabelle Stengers

Nous arrêterons ici de manière forcément un peu arbitraire la liste des auteurs que nous analysons : ceux que nous avons évoqués sont les plus influents jusqu'au milieu des années 1990. Il faudrait étendre plus au long ces analyses à des chercheurs comme Bernard Feltz ou Isabelle Stengers. Sans vouloir les ranger dans la même famille de pensée, nous les aborderons tous deux très succinctement dans ce paragraphe car leur poids, chez les scientifiques eux-mêmes, a été bien moindre pour la période qui nous occupe.

Après une étude minutieuse et différenciée d'un point de vue épistémologique de deux cas de modélisation mathématique en biologie, Bernard Feltz propose une « conception modeste » de la méthode des modèles. Suivant en cela Jean Ladrière, Bernard Feltz rappelle qu'il faut éviter de proposer des carcans épistémologiques à la science. Il remarque pourtant que, dans la méthode des modèles, c'est l'approche « globale » et non l'approche « totale » qui prime : les modèles tendent à ne plus être purement perspectivistes et pragmatiques même s'ils ne valent en revanche qu'à une échelle donnée. En ce sens, ils sont globalisants mais pas totalitaires[1]. Bernard Feltz ne s'attarde pas en revanche sur les simulations informatiques.

Au contraire, Isabelle Stengers s'est dernièrement intéressée aux modèles jusque dans la forme récente des simulations en vie artificielle. Arguant du fait que le comportement du modèle nous conserve toujours une forme de mystère, elle rappelle que l'on ne sait jamais dans quelle mesure exacte le modèle est pertinent : il faut donc l'utiliser avec « tact » [2]. Le tact est une forme de « négociation rusée »[3] que le modélisateur doit avoir avec son modèle de manière à en tirer une information qui n'est jamais obvie, de par la complexité de sa conception, surtout depuis l'époque où ce sont les ordinateurs qui sont devenus les supports des modèles. Isabelle Stengers prend acte de l'actuelle opacité des modèles, en particulier celle des modèles mathématiques de systèmes dynamiques à grand nombre d'équations. Toutefois, elle ne prend pas véritablement comme objet d'étude les récentes simulations orientées-objet et à visée de réplication réaliste. Son discours semble alors ne porter que très incidemment sur la simulation informatique proprement dite.

Le linguisticisme : réunion des deux traditions

À l'issue de ces quelques jalons d'histoire de la philosophie des modèles, nous pouvons essayer de confronter les deux traditions : continentale-française d'un côté, anglo-saxonne de

[1] [Feltz, B., 1991], pp. 310-312.
[2] [Stengers, I., 1997], p. 113.
[3] [Stengers, I., 1997], p. 117.

l'autre. L'épistémologie française n'a-t-elle pas finalement aussi une racine linguisticiste ? Si oui, à quoi peut-on l'attribuer ?

En effet, on a vu que l'interprétation du modèle comme pure schématisation théorique ou valant comme substitut de schématisation théorique demeure une constante de l'épistémologie française, au moins jusqu'au début des années 1990[1]. La simulation comme modèle détaillé, mimétique et à valeur empirique, est systématiquement déconsidérée ou ravalée au rang d'une activité ludique ou heuristique prospective. Or, de plus en plus de scientifiques parlent aujourd'hui de « laboratoires virtuels »[2], d'« expériences virtuelles » ou d'« expérimentation sur mondes artificiels »[3]. Faut-il continuer à nier le fait que tous ces scientifiques essaient par là de se rendre compréhensible un changement qui s'opère sous nos yeux dans la pratique des modèles ? Ou faut-il encore les renvoyer à leurs idéologies ? L'épistémologie française actuelle est encore, pour une grande part, hostile au fait d'admettre et de penser cette évolution, ou cette innovation, dans la pratique scientifique.

Cela lui vient notamment de ses attaches philosophiques. Nous voulons ici revenir sur ces soubassements philosophiques pour confirmer notre caractérisation et notre mise au jour de ce que nous avons appelé le linguisticisme. La déconsidération de la simulation caractérisait en effet déjà la position *princeps* de Canguilhem, philosophe pourtant contemporain des premiers modèles cybernétiques. Elle sera relayée très durablement comme nous l'avons montré en détail. Ce rendez-vous manqué de l'épistémologie avec la science est bien, croyons-nous, le signe d'une reprise en charge inconsciente de l'iconoclasme judéo-chrétien par l'épistémologie au moyen d'une réactualisation de la pensée hégélienne pour l'essentiel, mais également nietzschéenne, pour les pensées qui se sont trouvées à la marge de l'épistémologie universitaire. Cette responsabilité se serait ainsi déplacée de la religion ou des idéaux politiques dans l'épistémologie elle-même, conçue comme prise en charge des savoirs humains comme de la culpabilité de la culture, ainsi que nous en avons ébauché la démonstration avec Bachelard, Serres, Dagognet, Quéau, le premier Granger ou Latour. Nous n'avons pas à juger de cet état de la culture judéo-chrétienne ni de la forme qu'ont pu prendre ses choix implicites. Peut-être n'y en avait-il pas d'autres face aux stigmates indélébiles des cataclysmes humains du siècle passé. En ce qui concerne Nietzsche, on pourrait pourtant nous objecter qu'il a justement été le premier philosophe à dénoncer avec force la sécularisation des catégories judéo-chrétiennes dans la philosophie même. Convaincu par le travail récent de mise en perspective de la « querelle de la sécularisation » effectué par Jean-Claude Monod, nous ne pouvons en effet que concéder l'idée que Nietzsche fut décisif pour cette prise de conscience[4]. Mais, ajouterions-nous, si Nietzsche a réussi à ne pas être victime de cette sécularisation sur le plan de *la philosophie morale et politique* (seule concernée jusqu'à présent par la désormais classique « querelle de la sécularisation », ainsi donc que par le travail de Jean-Claude Monod lui-même), c'est *parce qu'il* en était profondément resté la victime sur le plan épistémologique. Ainsi est-ce en réitérant le geste biblique du refus des idoles qu'il construit sa propre thèse généalogique et qu'il peut ensuite violemment relativiser les représentations absolues de l'absolu, comme donc aussi les idéologies de la vérité. Même s'il nous faudrait plus de place pour le montrer en détail, Nietzsche ne procède donc qu'à un

[1] À la décharge des épistémologues, c'est parfois encore le cas des scientifiques qui en restent à la « rupture épistémologique » des années 1960 selon laquelle le modèle, de représentation fidèle et théorique, serait devenu une image idéalisée et dont le contenu serait toujours conditionné par l'utilisation spécifique qu'on veut en faire. Voir [CNRS, 1996], pp. xiv-xv.
[2] [Prusinkiewicz, P., Lindenmayer, A., 1990].
[3] [Treuil, J.-P. et Mullon, C., 1996].
[4] Voir [Monod, J. C., 2002], pp. 81-94.

déplacement, non à un dépassement de la matrice judéo-chrétienne. En ce sens, il ne fait que préparer et préfigurer tous les actuels *iconoclasmes paniques* qui se font jour devant une nature entre-temps absolutisée.

Pour ce qui nous concerne plus directement, et comme nous ne pouvons aborder une histoire des sciences contemporaines sans disposer de quelques outils épistémologiques, il nous fallait revenir sur ce que nous avons appris à percevoir comme les limites de l'épistémologie contemporaine face au défi de penser la simulation informatique. Cette orientation linguisticiste, dont nous avons parlé, se retrouve en effet à peu près chez tous les philosophes des sciences depuis les années 1930, aussi bien dans cette épistémologie dite « continentale » qu'est l'épistémologie française que dans le positivisme logique. Elle s'est parfois durcie encore chez nos contemporains les plus proches. Elle est, selon nous, le signe clair que la raison épistémologique en demeure encore, pour l'essentiel, à une espèce bien définie d'anthropomorphisme. Bien que très satisfaisant, du point de vue de l'économie psychique, pour l'esprit de l'épistémologue ou du sociologue, à l'instar de la séduction que pouvait avoir l'anthropomorphisme des anciens, ainsi que Bachelard lui-même l'a amplement montré, le linguisticisme nous maintient dans l'ignorance en nous faisant croire au pouvoir magique de la nature par principe langagière ou, plus largement, *exprimée dans* ou *médiée par* des signes ou des symboles, des choses que nous cherchons à connaître et comprendre ou expliquer. Le linguisticisme projette donc bien par avance sur ce qui est à connaître une caractéristique qui se donne d'abord seulement comme humaine dans le vécu immédiat des relations interpersonnelles. Dans la première phrase de la *Phénoménologie de l'Esprit*, Hegel lui-même nous avait pourtant bien prévenu : pour développer la science de l'expérience de la conscience, il part explicitement du vécu immédiat. Notre prétendue méfiance à l'égard de l'immédiat aurait justement dû intervenir dès ce départ. Et les promoteurs du « construit » médiat aux dépens du « donné » immédiat, Bachelard le premier, auraient pourtant dû nous prévenir contre toute adhésion de principe au linguisticisme qu'Hegel allait professer dans les lignes qui suivaient cet avertissement méthodologique. Hegel reste donc aristotélicien sur ce point en ce sens précis que son épistémologie dialecticiste est en fait construite elle-même sur une intuition, sur un sentiment immédiat donc, concernant notre rapport cognitif médiat au monde et aux choses du monde : *le sentiment hégélien de la médiateté de tout rapport au monde est lui-même immédiat*[1]. De là vient tout l'optimisme rationaliste et quelque peu prématuré de la doctrine hégélienne. C'est là une des sources de l'anthropomorphisme fondamental, et persistant, de l'épistémologie contemporaine des modèles, qu'elle prenne une forme d'idéalisme dialectique ou de matérialisme dialectique ou pragmatique/praxique.

À ce titre donc, on a, selon nous, insuffisamment réfléchi sur ce qu'il restait de naïvetés épistémologiques dans beaucoup de lectures simplistes et utilitaires du texte hégélien du début de *La Phénoménologie de l'Esprit*, alors même qu'il est un point de repère et un point de départ pour plusieurs générations de philosophes français, surtout après la traduction de Jean Hyppolite et les exégèses multiples plus ou moins biaisées qui ont précédé la guerre (Kojève aux Hautes Etudes en 1933-1934) et celles qui l'ont suivie (Labarrière, Garaudy, Lefebvre et les néo-marxistes en général).

[1] Tirant la leçon du premier Bachelard, nous dirions que le dialecticisme épistémologique contemporain serait lui-même à « psychanalyser ».

Dans le même ordre d'idées, lorsque Bachelard, avant guerre, prône une « psychanalyse de la connaissance objective »[1], il ne s'aperçoit pas qu'il fait l'hypothèse implicite, fortement contestable et réductrice, selon laquelle la connaissance objective n'est toujours qu'une parole. Il nous semble en effet qu'on ne peut « psychanalyser »[2] qu'une parole au sens large, c'est-à-dire toute manifestation matérielle ou activité ou pensée soutenue par une intention singulière de signifier[3]. Ainsi Bachelard impose tacitement que la connaissance objective ne soit constituée que de jeux sur des signes ou des langages, ce dont hériteront la plupart de ses successeurs, comme nous l'avons montré. L'élargissement, après-guerre, de la première forme de sa doctrine à la fameuse thèse de la phénoménotechnique ne sera que le simple passage, dès lors prévisible, de ce linguisticisme dialecticiste à une pragmatique prise encore une fois au seul sens de la linguistique. Cette interprétation dialecticiste de la *praxis* de la science pourra alors tout naturellement consoner avec les néo-hégélianismes d'Althusser et de Badiou. Dans ces néo-marxismes, la dominante linguisticiste bien évidemment demeure pour l'essentiel, et cela, malgré la foi matérialiste qui se révèle alors comme seconde par rapport à l'option hégélienne implicite au sujet de la nature dialoguante, discursivement exprimée ou médiée de tout rapport cognitif. Pour revenir à Bachelard, il n'est alors pas étonnant qu'il lui paraisse naturel et adéquat d'adjoindre ensuite à cette doctrine une lecture néo-hégélienne (dialecticiste, d'où son « rationalisme dialectique ») de la science en marche, puisque l'épistémologie hégélienne telle qu'on la concevait à l'époque se résumait souvent à un commentaire du début de *La Phénoménologie de l'Esprit*, insistant sur le caractère propre à toute expérience sensible, ou toute intuition, d'être toujours déjà de « parole » : toujours construite, ou vécue, mais jamais immédiatement donnée donc.

Les réflexions que Jean-Michel Salanskis mène sur l'anti-kantisme contemporain rejoignent, sur ce point, notre caractérisation générale de l'épistémologie française. Ce qu'il appelle un anti-kantisme et un néo-hégélianisme « historiste » [4] est, *grosso modo*, ce que nous appelons un linguisticisme dialecticiste. La différence entre ces deux caractérisations provient du fait que Jean-Michel Salanskis s'appuie plus largement sur les philosophies de l'événement qui ont suivi le structuralisme : Deleuze et Lyotard. Pour l'approche qui est la nôtre, nous n'avons pas cru pertinent d'intégrer ces auteurs à notre panorama cursif de l'épistémologie française, dans la mesure où leurs contributions à la réflexion sur les modèles est faible. De plus, et à la différence de Salanskis, nous ajoutons le constat que le nietzschéisme lui-même, en tant que forme particulière de linguisticisme, a servi d'arme argumentative dans ce combat que nous jugeons plus généralement porté contre l'intuition et contre toute forme de représentation simplement reproductrice, et pas seulement « contre » Kant et « pour » Hegel.

Mais d'abord, comment peut-on expliquer un tel accord sur le nécessaire retour à la doctrine hégélienne dans les épistémologies françaises d'après-guerre ? Comme on le sait aujourd'hui et comme le signale le travail récent d'Emmanuel Renault sur *La naturalisation de la dialectique*[5] chez Hegel, il faut rappeler que beaucoup des commentateurs français d'avant-guerre et d'après-guerre ont pâti de la difficile accessibilité de la « philosophie de la nature » hégélienne proprement dite. Nous irions jusqu'à dire qu'ils ont donc le plus souvent reconstruit, en conformité avec les

[1] En revanche, il nous paraît bien plus justifié de prôner aujourd'hui une « psychanalyse de l'épistémologie ». On ne peut nier, nous semble-t-il, qu'elle ne soit qu'un ensemble de paroles ou de discours, différant bien en cela de son objet propre : la science.
[2] À supposer même, ce qui est très contestable, qu'un tel verbe puisse être transitif. Dans l'orthodoxie freudienne, le psychanalyste ne « psychanalyse » pas le patient. Il est l'« analysant » pour l'« analysé ».
[3] C'est pourquoi la production toujours seconde, le *discours* sur le discours, ou sur la pratique scientifique, qu'est et reste en revanche la conscience épistémologique elle-même nous paraît plus pertinemment « psychanalysable ».
[4] Voir [Salanskis, J.-M., 2001], pp. 199-235.
[5] [Renault, E., 2001], pp. 7-8.

besoins psychologiques et intellectuels de l'esprit du temps, une épistémologie hégélienne à partir du seul début de la *Phénoménologie de l'Esprit* et du chapitre peu explicite de l'*Encyclopédie* consacré à la philosophie de la nature. Il est tout à fait significatif que, pour sa part, face à ces simplifications abusives, dont nous laissons la dénonciation détaillée aux spécialistes de la pensée de Hegel, Emmanuel Renault encourage aujourd'hui les historiens de la pensée à reprendre cette doctrine par les trois chemins qui naturellement et tout à la fois y mènent et en partent : « l'histoire de la philosophie, l'histoire de la philosophie des sciences et l'histoire des sciences »[1]. Nous souscrivons totalement à ce programme intégratif et compréhensif dans la mesure où nous avons commencé à esquisser, plus haut, une démonstration du fait que Hegel semble avoir été utilisé un peu à tort et à travers pour improviser des épistémologies ayant pour but (explicite) de contrer tout à la fois le bergsonisme, la phénoménologie husserlienne et le positivisme anglo-saxon, mais dont l'objet (implicite) consiste, selon nous, en une réassomption déplacée de l'iconoclasme biblique.

Donc, que semble dire le texte de Hegel et, surtout, comment a-t-il été souvent compris ? Nous ferons ici quelques brefs rappels très simplificateurs. Ils serviront à montrer que c'est bien déjà le langage qui s'impose et s'interpose dans toute relation cognitive selon cette perspective épistémologique si influente parce que si séduisante pour le philosophe. En effet, cela lui facilite grandement la tâche épistémologique, car les finesses des relations de connaissance peuvent être allègrement, indistinctement et en bloc, rapportées au même schéma nivelant et séduisant de la dialectique idéalo-matérielle. C'est alors l'occasion pour la philosophie des sciences de ne plus du tout approfondir et analyser la conceptualisation propre au travail scientifique, c'est-à-dire ce que Kant appelait la « construction des concepts » dans ou devant l'intuition, alors même que pourtant, et c'est tout à la fois paradoxal et significatif, les épistémologues français d'après-guerre se rallient presque tous au mot d'ordre de Cavaillès selon lequel il faudrait passer à une « philosophie du concept »[2].

Rappelons donc que, selon le début de *La Phénoménologie de l'Esprit*, la « sensibilité », source de connaissance prétendument fondamentale pour beaucoup et à quoi Hegel semble réduire l'intuition précédemment et finement thématisée par Kant, ne donne finalement comme certitude que celle, vague et encore abstraite, de la totalité de l'être, mais aucunement celle de la connaissance d'une chose singulière présente ici, devant nous et dans l'instant. C'est en quoi l'enseignement du sensible ou de l'intuitif est essentiellement négatif : notre sensibilité nous indique que ce que nous prenions pour le plus concret et le plus immédiat est en fait le plus abstrait et le plus médié. Le déploiement même de l'expérience sensible indique combien demeure en la sensation une médiation logique, c'est-à-dire linguistique, cachée. En tant que simple exemple de ce qui est sensible, c'est-à-dire comme simple instanciation d'un universel, c'est-à-dire encore en tant que singulière présentation d'un concept subsistant dans le langage, le senti ici et maintenant se donne sur un mode second, médié, c'est-à-dire sur un mode construit par et dans le langage. En effet le langage, en tant que porteur de l'universel, car tissé de mots, l'attend toujours déjà comme exemple immédiat et singulier de cet universel. Le langage donc produit une contradiction performative. En promouvant le ceci au rang d'instanciation d'un concept, il lui fait une côte mal taillée. Il dit au ceci : tu es telle sorte d'immédiateté. Il le qualifie donc, trahissant par-là sa plus grande valeur et la vérité selon laquelle il était toujours déjà là avant lui, avant que ne

[1] [Renault, E., 2001], p. 11.
[2] Voir [Canguilhem, G., 1955] et [Lecourt, D., 1972] par exemple. Selon nous, il y aurait lieu de distinguer une philosophie du concept d'une philosophie de la conceptualisation tout comme d'une philosophie de la conception ou fabrication.

vienne au jour et se manifeste le pur ceci. Il trahit sa propre priorité d'abord inaperçue dans la sensation :

« L'universel est donc en fait le vrai de la certitude sensible.

C'est aussi comme un universel que nous prononçons le sensible. Ce que nous disons, c'est ceci, c'est-à-dire le ceci universel, ou encore il est, c'est-à-dire l'être en général. Nous ne nous représentons pas assurément le ceci universel ou l'être en général, mais nous prononçons l'universel. En d'autres termes, nous ne parlons absolument pas de la même façon que nous visons dans une certitude sensible. Mais comme nous le voyons, c'est le langage qui est le plus vrai : en lui, nous allons jusqu'à réfuter immédiatement notre avis ; et puisque l'universel est le vrai de la certitude sensible, et que le langage exprime seulement ce vrai, alors il n'est certes pas possible que nous puissions dire un être sensible que nous visons. »[1]

Il faut comprendre ici que l'universel concret n'est pas à disposition mais qu'il s'esquisse déjà comme universel dans le langage : en effet les mots sont des généralités sinon il y aurait autant de mots que de sensations singulières, de choses, etc. Le langage universalise donc toujours. Le langage humain, de par cette caractéristique foncière, est déjà la promesse et la marque du renoncement à la connaissance immédiate qu'il nous faut accepter de vivre pour parvenir finalement à connaître en vérité. Mais l'intuition sensible se voit d'abord congédiée en tant que source de connaissance puisqu'il n'y a de connaissance que dans le langage et que la seule chose qu'elle puisse nous « dire » est qu'elle n'est pas le tout du concept ou du mot qui pourtant sert à la désigner. Mais bien entendu, Hegel n'oublie pas la sensibilité car elle participera, au final, à la récollection du Savoir Absolu. Elle était déjà une figure de la connaissance bien que pourtant d'abord essentiellement négative.

Que conclure de ce rappel très simplifié, voire caricatural, si ce n'est que « la logique hégélienne part d'une identification de la pensée et de la chose pensée »[2], comme le dit, en résumé, Jean Hyppolite ? Il ne nous appartient pas de nous demander ici si cet apparent « départ » hégélien est légitime. Mais il nous est en revanche possible de nous demander si ce passage, à lui seul, peut commander une épistémologie véritablement adaptée au projet de penser les nouveaux modes de conceptualisation et de représentation dans les sciences contemporaines. Pourquoi en effet faudrait-il que nous projetions cette nature parlante propre aux hommes dans les choses et que nous y voyions un défaut de connaissance lorsqu'elles ne nous parlent pas ? Pourquoi faudrait-il leur reprocher de ne pas parler et partir du principe qu'elles le devraient et qu'elles le feront à terme si on les « travaille » suffisamment (matérialisme dialecticiste de Marx) ou si les hommes se travaillent eux-mêmes suffisamment (idéalisme dialecticiste de Hegel) ? Dans cette résolution dialectique du vieux problème de l'accord du singulier et de l'universel[3] dans la connaissance, ne peut-on pas d'emblée déceler une forme assez grossière d'anthropomorphisme ? En effet cette philosophie des sciences, si elle ne se résume qu'à une sur-sollicitation de tels passages, se rend coupable de plaquer aventureusement des catégories *a priori* seulement valables dans le champ inter-humain sur le champ des autres types de relations qu'entretiennent les hommes. Toute relation avec le monde est-elle en effet nécessairement aussi d'ordre dialogique/dialectique, c'est-à-dire d'ordre linguistique ? Il est au moins permis d'en douter. C'est simplifier formidablement le problème épistémologique que de penser le phénomène réel (ou

[1] [Hegel, G.W.F., 1807, 1939], p. 84.
[2] [Hyppolite, J., 1953], p. 3.
[3] C'est bien d'ailleurs cette thématique qui oriente toute la réflexion du premier Granger.

la pratique réelle) comme étant toujours déjà de langage, comme se mouvant essentiellement dans l'élément du langage et comme ne demandant qu'une chose : parvenir à se dire ce qu'il est pour vraiment devenir ce qu'il est. C'est le rendre un peu trop magiquement, et par principe, complice de l'entreprise humaine de l'accession à la connaissance. Et c'est se rendre coupable de forcer la solution épistémologique en plaquant des catégories humaines de relations inter-humaines, c'est-à-dire un modèle bien connu, sur d'autres champs de relations, c'est-à-dire sur une réalité encore mal connue. Cette erreur est pourtant dénoncée maintes fois en science par ceux mêmes qui la commettent en épistémologie.

Jean Hyppolite a bien montré que, dans le cas de la *Phénoménologie de l'Esprit*, la motivation principale de Hegel, quant à lui, pour l'affirmation de ce départ et de ce principe, tient à sa volonté qu'il ne demeure rien d'ineffable. Faut-il que cette volonté soit nécessairement aussi celle des épistémologues contemporains ? Hyppolite s'en explique en tout cas pour Hegel : « renoncer au discours, à la communauté instituée des consciences, ou se livrer au sentiment qui est au-dessous du langage c'est tout un »[1] ou encore « il faut que la conscience de soi ne soit pas une singularité ineffable enfermée dans sa propre intuition ; il faut que le discours humain soit à la fois le discours de l'être et le discours d'une conscience de soi universelle »[2]. Telle est bien la foi ou l'espérance de Hegel et dont il tire toutes les conséquences optimistes et rationalistes.

Les autres interprétations de Hegel sur ce point vont presque toutes dans le même sens. Celle d'Alexandre Kojève par exemple :

« Réalité = Réalité révélée = Vérité = Concept = Logos. La réalité dont nous parlons implique notre discours (Logos) puisque lui aussi est réel. Parler d'une réalité qui ne l'implique pas (objet sans sujet) c'est donc parler d'une abstraction, c'est parler (philosopher) abstraitement. (Or l'Objet qui implique le Sujet est Esprit, Geist. L'Etre concret est donc Esprit.) »[3]

L'interprétation de Pierre-Jean Labarrière également :

« L'intelligence de cet immédiat est ce qui exige la médiation la plus vaste. »[4]

Celle de Roger Garaudy :

« La certitude ne peut être immédiate.

D'abord parce que le donné lui-même est une illusion et implique contradiction […] La certitude n'est plus immédiate mais médiatisée : l'objet entre déjà dans une catégorie universelle : celles des choses qui sont même si elles ne sont pas immédiatement senties. »[5]

Pour justifier très succinctement notre introduction du terme général « linguisticisme »[6], il nous suffit maintenant de montrer que l'un des philosophes le plus farouchement hostile (avec

---

[1] [Hyppolite, J., 1953], p. 7. Comme on l'a vu, c'est précisément cet argument qu'utilise François Dagognet contre l'iconoclasme platonicien.
[2] [Hyppolite, J., 1953], p. 11.
[3] [Kojève, A., 1947, 1990], p. 45.
[4] [Labarrière, P.-J., 1968, 1985], p. 74. Labarrière insiste moins cependant qu'Hyppolite, Lefebvre ou Bruaire sur le rôle fondamental du langage chez Hegel.
[5] [Garaudy, R., 1966], pp. 42-43.
[6] Nous rappelons que par linguisticisme, nous entendons désigner toute approche épistémologique qui considère que toute représentation scientifique, plus généralement cognitive, est de nature linguistique ou peut se ramener à du langage.

Kierkegaard) à cette vision panrationaliste optimiste, nous voulons dire Nietzsche, a produit une théorie similaire de la médiation nécessaire à partir du même constat évident : les mots disent des généralités, donc ils mentent dans la mesure où ils échouent à exprimer le singulier. Bien évidemment, l'approche généalogique, et passablement inspirée de Darwin, propre à Nietzsche ne lui fait pas supposer que le langage préexiste et rencontre ensuite nos expériences, comme c'est le cas en revanche pour Hegel. Au contraire, le langage est construit à partir des insuffisances de l'état biologique supposé originaire des hommes. C'est le regroupement des hommes dû à leur faiblesse et à la prise en compte de leurs besoins qui a fait que le langage est apparu. Donc les signes et les mots sont le fruit d'une mise en commun : c'est pourquoi ils sont généralisants, communs voire vulgaires. Pour une raison très différente de celle qui est invoquée par Hegel, le langage est donc selon Nietzsche la forme universelle et vulgaire qui nous a permis de communiquer avec les autres et de désigner vaguement et vulgairement les choses[1]. En ce sens, ils ne peuvent indiquer le singulier. Mais nous n'avons de rapport scientifique aux choses que par le langage puisque le langage, la volonté de vérité, la morale et la science sont en fait des phénomènes humains nés tous ensemble d'une même faiblesse. Mais ces mots, du fait qu'ils sont communs, humains trop humains, n'indiquent aucunement la réalité des choses et des êtres dans leur singularité.

Que l'on conçoive donc une épistémologie française d'influence hégélienne ou nietzschéenne, on tombera toujours sur ces deux arguments, repris et adaptés de l'iconoclasme biblique :

1- le langage est nécessaire pour connaître,
2- le langage est insuffisant pour connaître.

Si l'on ajoute que les modèles et les simulations sont des objets de science donc toujours des discours, des écritures ou des langages, il n'est pas étonnant que l'on retombe constamment sur un iconoclasme consensuel et de bon aloi, car se vêtant toujours du manteau respectable et confortable psychiquement de l'anti-idolâtrie. On affirme ainsi que l'expression discursive jamais ne convient à la connaissance de la singularité[2] mais que pourtant il n'y a pas d'autre type de rapport cognitif avec le monde. L'aventure occidentale peut continuer imperturbablement.

Selon nous, malgré sa fécondité par le passé et dans d'autres domaines, ce cadre interprétatif linguisticiste ne convient aucunement à une épistémologie de la simulation informatique actuelle[3]. Il n'est bien sûr pas étonnant que les développements de la science exposent rapidement l'épistémologie à ses propres insuffisances et la rendent rapidement caduque. Notre résultat serait méprisable s'il n'était que de cette nature, s'il ne visait qu'à invalider la pensée du passé par la réalité du présent. Ce jeu est évidemment bien trop facile, et donc suspect de stérilité, car il donne la victoire à tout coup. Nous n'avons donc pas à jeter la pierre aux épistémologues. Notre objectif est ailleurs. De ce résultat, nous voulons simplement inférer l'idée qu'il nous est aujourd'hui

[1] *Le gai savoir*, V, § 354, [Nietzsche, F., Tome II, 1993], pp. 219-220.
[2] Il existe pourtant certains travaux sur le langage du singulier. Dans le cas de [Hess, G., 1991], par exemple, il s'agit d'une reprise des catégories sémiotiques de Peirce, de manière à rendre compte du fait que la pensée de l'événement mythique peut être prise en charge par le langage. Mais, dans ce travail, il n'y a pas encore de réelle incursion dans l'épistémologie. De son côté, l'actuelle philosophie néo-réaliste post-wittgensteinienne d'inspiration anglo-saxonne (p. ex. [Bouveresse, J., 1995]), voulant briser en priorité avec le médiatisme, reste, à l'heure actuelle, dans les limbes de l'épistémologie des sciences de la nature. Elle n'en est donc qu'à ses débuts ; et on ne peut préjuger de son issue. Il nous faut attendre qu'elle sorte des problématiques de la perception élémentaire, qu'elle conçoit tout à la fois comme incarnée et parlée, pour en juger. Il est possible qu'elle propose à terme une solution innovante pour penser le rôle de la simulation informatique.
[3] Pour des arguments plus précis à ce sujet, voir [Varenne, F., 2003a].

possible d'écrire une histoire des idées et des sciences contemporaines précisément grâce aux insuffisances reconnues de l'épistémologie du passé récent, c'est-à-dire grâce aux insuffisances reconnues d'une pensée qui s'efforce pourtant vers la compréhension du présent de la science, et cela du fait que ces insuffisances nous indiquent clairement qu'il est possible, si ce n'est de dépasser cette épistémologie, tout au moins de ne pas coller totalement à cet esprit du temps auquel elle participe tout autant que la science contemporaine et dont on peut voir désormais clairement, mais cela ne nous était justement pas possible avant l'avènement de la simulation informatique pluriformalisée, qu'il s'éloigne de nous et qu'il prend donc une forme enfin compréhensible et interprétable du point de vue de l'histoire, et non plus une forme confuse dans laquelle l'historien des sciences baignerait sans même le savoir, du fait de ses préjugés épistémologiques informulés ou injustifiés. Ce que nous a permis dès lors cette brève étude d'histoire de la philosophie au regard de l'histoire des sciences, c'est de montrer qu'il nous est possible de nous arracher d'ores et déjà quelque peu au présent, et d'objectiver notre passé récent grâce à ces premières caractérisations saisies au travers d'insuffisances déjà reconnaissables pour nous, contemporain.

Si cette caractérisation ne nous permet pas un dépassement (Y en a-t-il ? Et faut-il en espérer un ?) du moins nous autorise-t-elle un décollement sensible, un déplacement supplémentaire de notre perspective à l'égard de ces épistémologies embarquées dans leur présent, notamment quant à cette question des modèles. C'est la raison pour laquelle cet exposé analytique de l'état de la question en philosophie des sciences nous a servi essentiellement à en refuser l'option implicite assez générale, à discerner le malaise et les hésitations que cette philosophie manifeste de manière rétrospectivement compréhensible, pour nous hisser autant que possible hors de la vision purement linguisticiste de la représentation scientifique et nous rendre ainsi plus réceptif à la nouveauté scientifique des dernières années. Les quelques propositions de Pierre Lévy, l'évolution tardive de Gilles-Gaston Granger, la lecture critique d'Anne-Françoise Schmid, comme les hésitations légitimes de Daniel Parrochia nous indiquent déjà probablement la voie. L'histoire de l'épistémologie est donc bien, elle aussi, une histoire jugée, du fait même que son objet est la science. Celle-là hérite des sanctions qui traversent celle-ci. La critique de l'histoire récente de l'épistémologie n'est cependant pas un pur jeu gratuit, cruel et facile[1], mais elle nous donne du recul dès aujourd'hui, alors même que nous en avons tant besoin pour l'écriture contemporaine d'une histoire des sciences et des idées qui ne cesse de se faire et de se nouer sous nos yeux.

[1] Voir nos essais d'un début d'épistémologie alternative *in* [Varenne, F., 2003a].

ANNEXE C

Linguistique structurale, modélisation et « grammaires de Chomsky »

Sans prétendre viser ici une quelconque exhaustivité, nous rappellerons en quelques mots comment la linguistique américaine, à partir du début des années 1950, a poussé jusqu'au bout puis combattu en interne son propre béhaviorisme et descriptivisme bloomfieldien d'une manière cependant différente de celles qu'adoptèrent antérieurement Jakobson, ou même Hjelmslev, et cela de manière à développer une approche de modélisation mathématique. Tel est le contexte dans lequel la technique et l'épistémologie des grammaires génératives ont pu en effet voir le jour. Or ce sont elles qui sont à mettre en regard avec les travaux en simulation de la morphogenèse biologique accomplis par Lindenmayer, une décennie plus tard.

De la théorie distributionnelle des unités linguistiques aux « grammaires de transfert » : Zellig S. Harris (1909-1992)

Sans vouloir entrer dans le détail de l'origine puis de l'évolution des idées du linguiste américain Zellig Sabbetai Harris[1], il est nécessaire d'évoquer quelles furent ses idées majeures et les liens qu'elles entretinrent ensuite avec celles de Chomsky. Il nous faut donc avant tout rappeler que Harris s'est formé à la linguistique au moment où le béhaviorisme de Bloomfield, qui s'était originellement développé à Yale, conduisait une grande partie des chercheurs américains, dans leurs analyses de la distribution des unités linguistiques d'une langue (morphèmes ou phonèmes), à s'efforcer de ne pas recourir au mentalisme, c'est-à-dire à récuser toute forme de renvoi à une opération cachée de l'esprit qui ne soit pas objectivable scientifiquement. Or, Bloomfield, dans ses propres travaux sur l'alternance, dans la langue, des morphèmes et des phonèmes, avait conservé une référence non seulement à la *distribution* formelle mais aussi au *sens* de certaines de ces unités. C'est précisément ce résidu de sens dans la théorie bloomfieldienne qu'il faut, selon Harris, définitivement éradiquer[2]. Après des travaux plus empiriques, l'essentiel des premières conceptions théoriques de Harris s'est donc d'abord formé, dès les années 1930 et 1940[3], autour de ce projet de réduire encore la *part du sens*[4] dans l'analyse structurale de la langue.

C'est là qu'il propose en 1951 sa propre théorie distributionnelle. Il s'agit de redéfinir le concept de « distribution » d'une unité linguistique de manière à ce qu'à travers ce concept seul,

[1] Nous renvoyons pour cela à [Mounin, G., 1972], pp. 170-188, à [Robins, R. H., 1967, 1976], pp. 206-250, à [Steiner, G., 1971, 2002], pp. 140-172 et enfin à [Johnson, S., 2002], notamment pour les dernières publications de Harris. On trouve dans ce site internet les analyses les plus récentes de ses dernières œuvres. Ce site est maintenu par Stephen Johnson et par le département d'informatique de l'Université Columbia.
[2] Pour ces rappels, nous nous appuyons notamment sur [Mounin, G., 1972], p. 174.
[3] Voir la bibliographie de [Johnson, S., 2002].
[4] Pour une mise en perspective littéraire de cette réduction, voir [Steiner, G., 1989, 1991], chapitre 2 : « le contrat rompu », pp. 77-165.

toutes les différenciations[1] de la langue soient concevables et éventuellement prévisibles, sans qu'il y ait besoin de recourir à une méthode de distinction intuitive, donc nécessairement sémantique. Harris définit pour ce faire la distribution d'une unité linguistique comme « la somme de ses environnements ». Supposons en effet que l'on veuille savoir si [l] et [r] sont des phonèmes en anglais. Si l'on considère qu'il suffit de constater qu'ils permettent de différencier *life* de *rife*, alors on s'appuie en fait sur un recours implicite à la différence de sens entre ces deux termes. Pour Harris, cette méthode intuitive « est seulement un raccourci pris par le linguiste ou le non-linguiste pour atteindre aux véritables différenciations [qui sont] distributionnelles »[2]. Si l'on veut être scientifiquement rigoureux, c'est-à-dire ne pas se livrer à l'usage « mystique de termes philosophiques »[3], il faut, en théorie, ne recourir qu'à la distribution formelle correctes des unités dans la langue. En fait, Harris admet très vite un certain nombre d'entorses à cette loi qu'il présente d'abord comme indéfectible[4].

En outre, et comme le montrent Mounin et Hutchins, sans doute à partir de 1951 et de la publication du rapport de Bar Hillel, publié en prévision d'une conférence qui se tiendra au MIT en juin 1952 sur la « traduction par machine » [« *MT : Machine Translation* »][5], l'analyse linguistique théorique va être plus concrètement et plus consciemment confrontée à un problème qu'elle portait de toute façon en germe : celui de l'ambiguïté sémantique. Hors contexte, certaines phrases bien formées demeurent en effet ambiguës. Malgré les tentatives inchoatives et polémiques (car d'abord tournées en partie contre la thèse quinienne de l'impossibilité de la traduction) du second Carnap et visant à mettre en place une théorie de la sémantique formelle[6], la traduction

---

[1] L'idée que la langue est un *système de différences purement formelles* et non un système d'unités substantielles vient bien entendu déjà de Saussure.

[2] *Methods in Structural Linguistics*, University of Chicago Press, 1951, 3ème édition : 1957, n. 4, p. 7 ; extrait traduit et cité par [Mounin, G., 1972], p. 175.

[3] [Mounin, G., 1972], p. 175.

[4] Mounin rappelle également les contre-exemples apportés par les détracteurs de la théorie distributionnelle. Il existe ainsi des unités linguistiques (comme *boysen-* dans *boysenberries* = variété de mûre) qui n'ont pas d'environnement autre que celui qu'on leur connaît ponctuellement (ici *–berries*) et qui ne s'inscrivent donc pas dans un système de pures différences formelles.

[5] Pour une chronologie et une histoire circonstanciée de la « traduction mécanique », principalement aux Etats-Unis, voir [Hutchins, J., 1997a, 2003] et [Hutchins, J., 1997b, 2003]. Pour une histoire (déjà ancienne et datée mais suggestive) des prémices de travaux contemporains, similaires mais différents, essentiellement en URSS, voir [Delaveney, E ., 1958].

[6] Voir [Carnap, 1947, 1956, 1997]. Dans cet ouvrage, (*Signification et nécessité*), Carnap essaie de remplacer la fonction de nomination (correspondant à la relation sémantique habituelle) des termes par deux propriétés formelles conjointes adaptées des concepts frégéens de sens et de dénotation : l'intension et l'extension. Il peut construire ainsi une sorte de sémantique formelle permettant de se passer de la référence (donc, selon lui, de toute ontologie). En 1947, il applique ensuite cette nouvelle notation aux problèmes des logiques modales mais sans traiter directement les problèmes de traduction. Voir une présentation générale de son projet : *ibid.*, pp. 47-49. Mais dans un article de 1953 répondant plus particulièrement à Quine (qui avait, de son point de vue, démontré à la fois la relativité et l'irréductibilité de l'ontologie dans les langages naturels), Carnap utilise une version pragmatique du concept d'intension de façon à montrer qu'il est en droit possible qu'un « robot » (selon son propre terme) procède seul et objectivement à une analyse d'intension (le « robot » carnapien n'est d'abord qu'un dispositif de pensée conçu pour la seule argumentation théorique et servant d'arme contre le relativisme de Quine ; ce n'est donc pas exactement un ordinateur réel). En effet, le concept d'intension (ou de signification) d'un prédicat est défini par Carnap comme n'étant que ce qui conditionne un certain type de *comportement* linguistique : « l'intension d'un prédicat 'Q' pour un locuteur X est la condition générale qu'un objet *y* doit remplir pour que le locuteur X soir prêt à attribuer le prédicat 'Q' à *y* », *ibid.*, p. 362. C'est ce recours, dans la définition de l'intension, à un *comportement visible*, *objectivement représentable et formalisable*, qui fait que Carnap revendique que l'on rapproche son point de vue des perspectives béhavioristes de la psychologie. Voir *ibid.*, pp. 354-367. Voir particulièrement la page 367 : « L'intension d'un prédicat peut être déterminée pour un robot aussi bien que pour un locuteur humain, et même plus complètement si l'on connaît suffisamment la structure interne du robot pour prédire comment il fonctionnera dans différentes conditions. » Carnap se rallie alors explicitement au travail de Bar Hillel (qu'il cite) : « [Bar Hillel] appelle les linguistes à construire de manière analogue [la théorie de la sémantique formelle] la théorie de la signification dont ils ont besoin dans leurs recherches empiriques. Le présent article indique la possibilité d'une telle construction. Le fait que le concept d'intension puisse être appliqué même à un robot montre qu'il n'a pas le caractère psychologique qu'avait le concept traditionnel de signification », *ibid.*, p. 367, n. 1. Cependant, ce travail

automatique conçue sur la base d'une théorie purement syntaxique et formelle, semble donc devenir manifestement délicate voire impossible[1]. Cependant, Bar Hillel, en admettant que la traduction aura longtemps besoin encore d'un « *native speaker* » pour contrôler le travail automatique, pense que, moyennant cette condition, la faisabilité à court terme de telles machines est déjà démontrée. Et c'est pourquoi il fait tout de même un geste en direction des théories formelles de l'analyse structurale. Dans son rapport de 1951, Bar Hillel préconise en conséquence que le système mécanique programmé, si l'on veut qu'il ne soit pas seulement spécifique (c'est-à-dire conçu pour une traduction d'une langue précise en autre précise[2]) mais qu'il vaille pour n'importe quel type de traduction, s'appuie sur ce qu'il appelle une « grammaire universelle ». Or, selon lui, la tâche en incombe ici manifestement aux théoriciens de l'analyse structurale et des grammaires. La balle est donc dans leur camp.

Malgré les dénégations ultérieures de Chomsky[3], il est donc fort probable que Chomsky (qui est l'élève de Harris entre 1950 et 1954) et Harris lui-même consolident l'idée de « transformation » précisément sous cette impulsion-là[4] et ce, dès 1952[5]. C'est d'abord sous la forme de « grammaire de transfert » que, sous la plume de Harris, la notion de grammaire universelle fait son apparition en linguistique structurale : il s'agit de nommer par-là l'ensemble des règles formelles de transformations que l'on peut appliquer à certaines structures (phonologiques, morphologiques ou syntaxiques[6]) d'une langue-source pour en tirer les structures correspondantes dans la langue-cible.

Progressivement, l'expression « grammaire de transfert » va finir par désigner l'ensemble des « instructions »[7] nécessaires à la reconstruction des phrases d'une langue à partir de catégories et de classes d'unités linguistiques universelles de la même langue. D'un outil de traduction entre langues, elle devient donc un système axiomatique de génération de structures à l'intérieur d'une même langue. Mais Harris, conscient des difficultés multiples qu'oppose à la formalisation la complexité des langues réelles ne voit dans cette proposition qu'un travail préparatoire d'analyse et d'induction. C'est Chomsky (né en 1928) qui, en revanche, et à partir de

---

essentiellement théorique visant à démontrer une simple possibilité en droit ne donne pas le matériau formel effectif suffisant pour rendre opérationnelle une véritable explicitation mécanique de la signification. D'où le fait que, comme on le sait, les techniques de la traduction par machine devront encore trouver des chemins détournées et plus complexes pour tendre à devenir effectives.

[1] [Mounin, G., 1972], p. 183.

[2] En première approche, précise-t-il, ce type de traduction peut en effet se satisfaire d'une approche par essais et erreurs et par modèles statistiques, y compris pour le règlement du problème de l'ambiguïté sémantique.

[3] Voir [Robins, R. H., 1967, 1976], p. 248. Voir également l'entretien de 1969 avec George Steiner : « Je ne contesterais pas que l'image de l'ordinateur soit pour moi une intuition vivante, si par cette image vous renvoyez à la théorie abstraite du calcul – la théorie des machines de Turing, la théorie des fonctions récursives, la théorie des automates finis, etc. Cela a toujours été pour moi un modèle très conscient, et, comme vous le savez peut-être, j'ai beaucoup travaillé sur certains aspects de la théorie mathématique des automates, largement résumés dans mon article du *Handbook of Mathematical Psychology*, auquel vous faites référence. Mais si par 'image de l'ordinateur' vous entendez l'objet matériel, ce n'est en aucun cas pour moi un modèle, ni conscient ni inconscient. De fait, je n'ai jamais vu d'ordinateur et, pour ainsi dire, les ordinateurs ne m'intéressent pas. J'ai eu le sentiment, dès le début, que le principal effet de la disponibilité d'ordinateurs sur la linguistique (comme sur les humanités) serait de banaliser la recherche et de nous entraîner dans des directions absurdes ; avec le temps, cette conjecture initiale n'a fait que se renforcer », [Steiner, G., 1971, 2002], p. 146.

[4] Voir [Mounin, G., 1972], p. 172.

[5] Suite à des discussions qu'il avait eues avec Chomsky en 1950, la notion de « transformation » est proposée pour la première fois par Harris en 1951 dans un article de la revue *Language* afin de servir à l'analyse du discours et non pas à l'analyse de la phrase en unités linguistiques. Voir les retranscriptions d'entretiens avec Chomsky que fournit [Steiner, G., 1971, 2002], pp. 140 *sqq*. C'est seulement à partir de 1957 que la notion de « transformation » est appliquée par Harris à la structure de la phrase en elle-même. Cette notion est donc déplacée et transférée par Harris d'un niveau linguistique macroscopique à un niveau plus microscopique.

[6] Voir [Hutchins, J., 1997a, 2003], p. 7.

[7] Harris reprend ce terme à la théorie des machines.

son doctorat en linguistique soutenu en 1955 sur l'« Analyse transformationnelle » à l'Université de Pennsylvanie, donne un statut fermement hypothético-déductif à ces nouveaux construits formels que sont les « grammaires universelles »[1] ou « grammaires de transferts ». C'est bien là qu'il rejoint nettement une approche de type modélisation mathématique. En effet, afin de contrer les positions béhavioristes et pavloviennes du psychologue américain B. F. Skinner sur l'acquisition du langage chez l'homme[2], Chomsky reprend et modifie la notion de « grammaire de transformation », forgée auparavant par son maître, pour concevoir ce qu'il appelle un « troisième modèle » capable de récuser tous les modèles empiristes, et *a posteriori*, d'acquisition de la compétence linguistique.

Le troisième « modèle » : les choix épistémologiques de Noam Chomsky

Chomsky fait en effet passer la problématique de la formalisation de la langue, d'une question de traduction et d'analyse structurale descriptive, conçue en vue d'une traduction, à une question de synthèse et de recherche d'universaux formels sous forme de règles de transformation. Dans un entretien privé avec George Steiner remontant à 1969, il lève toute ambiguïté en précisant le point suivant :

« Harris, au fond, considère les transformations comme une relation définie sur des phrases qui ont été pleinement analysées avec des méthodes comme celles de son livre de 1951, i. e. *comme une sorte de prolongement de la linguistique descriptive. Mon point de vue a été de prime abord assez différent […] Où je m'écartais de Harris, c'était dans mon idée de la place des transformations dans le tableau d'ensemble. Pour moi, elles étaient partie intégrante du système permettant d'engendrer des phrases, de donner en premier lieu une explication analytique ou descriptive. »*[3]

C'est donc la raison pour laquelle, passant d'une approche analytique et descriptive à une approche synthétique et explicative, Chomsky adopte explicitement, et dès 1956, le terme de « modèle » qu'il apparente alors en fait très étroitement à celui de « théorie »[4] : « Etant donné par hypothèse l'ensemble des phrases grammaticales de l'anglais, recherchons quel type de mécanisme peut produire cet ensemble (ou, ce qui est équivalent, quel type de théorie rend compte de manière adéquate de la structure de cet ensemble d'énoncés) »[5]. Le modèle ou la théorie qu'il recherche est donc conçu à l'image d'un « mécanisme » de génération formelle et axiomatique.

---

[1] Dans [Hutchins, J., 1997a, 2003], l'historien anglais de la linguistique John Hutchins montre bien que même lorsque Bar Hillel parle de « grammaire universelle » ou d'« universaux », il ne s'agit toujours pour lui que d'invoquer la mise en place d'une *méthode d'analyse mécanique* partielle ne permettant jamais la complète régénération *via* un système formel axiomatique de toutes les phrases d'une langue acceptables du point de vue de la seule syntaxe : "certainly, there was no suggestion of a 'universal' syntactic representation and nothing corresponding to Chomsky's later idea of deep syntax", *ibid*., p. 10.

[2] La thèse du psychologue Burrhus Frederick Skinner (1904-1990) est que nous acquérons la compétence linguistique par des séquences de stimuli (d'origine sociale), de corrections, de renforcements et de conditionnements du même type que ceux qu'on observe dans le réflexe conditionné à la Pavlov. Or, Chomsky objecte que, dans ces conditions, on ne peut expliquer le fait que nous puissions comprendre des phrases jamais entendues et même des phrases dont la structure apparente nous est inconnue. Voir [Chomsky, N., 1959, 1967, 2000], *passim* et [Steiner, G., 1971, 2002], p. 144.

[3] [Steiner, G., 1971, 2002], p. 141.

[4] Voir [Chomsky, N., 1957, 1969, 1979], p. 13.

[5] [Chomsky, N., 1957, 1969, 1979], p. 21.

Dans un premier temps pour asseoir sa suggestion, Chomsky critique l'approche empiriste, parce qu'informationnelle et statistique, de Claude Shannon et Warren Weaver[1] pour cette raison qu'une langue naturelle, comme l'anglais par exemple, ne présente pas un langage à états finis[2]. En effet, un processus de Markov consiste à reproduire une phrase d'un langage en parcourant un diagramme d'états (d'une machine ou d'un automate virtuel) probabilisés de gauche à droite. Chaque transition entre états (de la machine supposée) représente l'ajout d'un mot, ou unité linguistique, à la phrase déjà constituée. Cette transition est pondérée d'une certaine probabilité. Si cet état admet une transition sous forme de boucle, cela signifie par exemple que l'on peut répéter plusieurs fois de suite le même mot[3] dans une phrase, pour exprimer une emphase par exemple. À côté de cela, Chomsky donne alors l'exemple de plusieurs langages formels simples dont les phrases présentent des symétries ou des enchâssements de phrases identiques. Ces phrases présentent une allure nettement récursive. Or, on peut montrer que ce type de langage, pour être engendré par un alphabet simple, doit utiliser des parenthèses couplées[4], ce qui ne peut être pris en charge par un automate séquentiel à états finis, surtout lorsqu'on le parcourt toujours de gauche à droite, comme c'est le cas pour le processus markovien de Shannon et Weaver. En effet, il n'y a pas de prise en charge de la récursivité[5]. De même, en anglais, des phrases subordonnées *Si* et *Sj* qui sont enchâssées dans des propositions conditionnelles du type « *If Si then Sj* » doivent avoir chacune un début et une fin formalisés par une sorte de parenthésage. Donc, comme de tels comportements récursifs ont parfois lieu dans le langage naturel, le modèle informationnel et markovien de Shannon et Weaver ne convient pas.

Finalement, ce que Chomsky reproche à ce modèle à états finis, c'est de ne pas permettre une formalisation correcte de la *structuration grammaticale* des phrases : « Nous avons vu qu'une théorie linguistique aussi limitée était inadéquate ; nous devons chercher un type de grammaire plus puissant et une théorie linguistique de forme plus 'abstraite'. »[6] Comme pour Woodger et Lindenmayer, c'est donc la « puissance » de la théorie (en quelque sorte le rapport du nombre de faits décrits sur le nombre d'axiomes nécessaires) qui est le critère le plus important pour Chomsky. C'est à cela que l'on reconnaît sa préférence pour une théorie axiomatisée et générative[7].

Cet appel à l'« abstraction » signifie pour Chomsky que l'on doit se méfier d'une approche épistémologique empirico-inductive qui ne tirerait ses idées que de l'observation, comme c'est le cas des modèles probabilistes informationnels. Le modèle informationnel n'est pas « abstrait », selon lui, puisque, pourrions-nous dire, il ne fait que représenter la *relation* empirique que vit concrètement la linguistique descriptiviste avec l'apparence la plus immédiate de son objet d'étude qu'est la langue. Un tel modèle de *relation* ne pourra donc servir à représenter directement les *objets* linguistiques ni surtout la *grammaire* qui, en intégrant les différents niveaux

---

[1] Qui, dans *The mathematical theory of communication* (Urbana, 1949, cité par [Chomsky, N., 1957, 1969, 1979], p. 22) proposaient un modèle de construction des phrases par processus de Markov à états finis. On peut supposer que Chomsky vise en fait plus précisément ici les suggestions de ses collègues Jakobson et Halle.
[2] [Chomsky, N., 1957, 1969, 1979], p. 27.
[3] [Chomsky, N., 1957, 1969, 1979], pp. 22-23.
[4] [Chomsky, N., 1957, 1969, 1979], p. 25, note 6.
[5] En fait, Chomsky signale que l'on pourrait artificiellement prendre en compte la récursivité au moyen d'un automate à états finis, notamment en ajoutant des bouclages et des conditions sur le nombre n de bouclages. Mais cela supposerait de spécifier par avance la longueur maximale d'une phrase, ce qui, est selon Chomsky, une « l'imitation inutile » : « L'important est qu'il existe des procédures de formation des phrases dont les grammaires à états finis sont intrinsèquement incapables de rendre compte », [Chomsky, N., 1957, 1969, 1979], p. 26. C'est dans de telles argumentations étonnantes que l'on voit le choix *a priori* de Chomsky pour l'élégance mathématique, la puissance et la généricité des modèles aux dépens de leur éventuelle praticabilité opérationnelle.
[6] [Chomsky, N., 1957, 1969, 1979], p. 27.
[7] Voir également [Chomsky, N., 1957, 1969, 1979], p. 39.

d'enchâssements linguistiques, joue déjà avec le *sens* et la logique intrinsèque du discours. À ce titre, l'idée que le modèle saisit sous une forme d'« intuition » la réalité linguistique reste prépondérante pour Chomsky[1]. C'est un candidat pour une théorie mécaniste et explicative.

Assez logiquement donc, le deuxième modèle que se propose mais que critiquera aussi Chomsky est celui qui repose sur l'analyse graduelle, par niveaux, des phrases en *constituants grammaticaux* de plus en plus élémentaires : au niveau le plus abstrait, une phrase est ainsi toujours constituée d'un syntagme nominal et d'un syntagme verbal ; le syntagme nominal est constitué d'un article et d'un nom ; le syntagme verbal est quant à lui constitué d'un verbe et d'un autre nom ; enfin, les articles, les verbes et les noms peuvent être spécifiés au point d'en venir à être représentés par des articles, des noms et des verbes précis[2]. C'est précisément cette dernière forme, la « séquence terminale » qui constitue la phrase proprement dite, dans son caractère concret.

Et là est l'essentiel pour le rapprochement avec Lindenmayer : une phrase peut donc toujours être représentée par l'arborescence de sa décomposition grammaticale graduelle[3]. À chaque étape de la décomposition, Chomsky considère que l'on applique ce qu'il appelle des « règles de réécriture »[4] afin de parvenir à l'étape suivante de cette formulation de moins en moins abstraite de la phrase. Chomsky montre alors que ce modèle de « réécriture » est plus « puissant » que le modèle de Markov. En effet, en droit, il permet la recomposition concrète de tout type de phrase à partir de son niveau linguistique le plus abstrait.

Cependant, Chomsky trouve un certain nombre de limitations à ce premier modèle génératif. La critique principale qu'il formule est celle qui consiste à faire remarquer que, dans ce genre de modèle visant à construire une structure grammaticale correcte à partir d'éléments finaux qui ne sont pas eux-mêmes déjà structurés, l'ordre des opérations de réécriture est crucial[5]. Or, un tel ordre des opérations ne peut pas être formalisé commodément dans ce genre de grammaire à simple réécriture et affectant un changement de niveau linguistique. En fait, même s'il adopte une approche par les niveaux linguistiques, et cela pour contrer la modélisation purement phénoméniste et informationnelle de Shannon (trop déracinée en ce sens), Chomsky ne pense pas que l'on puisse commodément voir émerger une structure grammaticale de ce qui ne serait pas déjà structuré, dès le départ : pour lui, si « nous abandonnons l'idée que des niveaux supérieurs sont littéralement construits à partir d'éléments de niveaux inférieurs, alors il devient beaucoup plus naturel de considérer des systèmes de représentation, même aussi abstraits que la structure transformationnelle (où chaque énoncé est représenté par la suite des transformations par lesquelles il est dérivé d'une séquence terminale de la grammaire syntagmatique) comme constituant un niveau linguistique »[6].

C'est pourquoi une « grammaire transformationnelle » sera une adaptation des grammaires à simples réécritures recomposantes ou décomposantes puisqu'on y partira toujours d'« éléments » pré-structurés, les « phrases noyaux » [« *kernel sentences* »], et non pas d'éléments simples comme l'article ou le verbe, etc. En fait, puisque l'émergence du structurel grammatical semble ne pas être aisément modélisable à partir des unités grammaticales atomiques, Chomsky réitère là le geste des mathématiciens et des logiciens du début du siècle en rapatriant entièrement les objets formalisés dans le structurel : le formalisme de la grammaire ne

[1] [Chomsky, N., 1957, 1969, 1979], pp. 68 et 95.
[2] Voir [Chomsky, N., 1957, 1969, 1979], p. 29.
[3] [Chomsky, N., 1957, 1969, 1979], p. 30.
[4] [Chomsky, N., 1957, 1969, 1979], pp. 30 et 31.
[5] [Chomsky, N., 1957, 1969, 1979], p. 40.
[6] [Chomsky, N., 1957, 1969, 1979], p. 67.

représente alors que des transformations algébriques à l'*intérieur* de l'espace des phrases toujours déjà structurées[1]. Comme l'individu formel dans les *Principia Mathematica* par exemple, l'individu grammatical (l'article, le verbe, etc.) est ici toujours déjà une classe. C'est une classe terminale de l'arborescence généalogique des classes. Il est donc de même nature formelle que les structures plus abstraites.

Finalement donc, ce qui peut caractériser les choix épistémologiques de Chomsky peut se définir en deux expressions : anti-phénoménisme et anti-réductionnisme. Comme les physiologistes ou les biophysiciens qui modélisent de façon non probabiliste et non réductionniste les phénomènes du vivant en partant directement de la dynamique du métabolisme au niveau cellulaire, c'est-à-dire d'un phénomène supposé receler en lui le cœur de ce qui fait la spécificité du vivant, et sans prétendre ainsi le voir émerger d'un modèle pris à un niveau seulement biochimique, Chomsky fait partir ses propres modèles à réécriture de ces sortes d'axiomes qu'il appelle les « phrases noyaux », c'est-à-dire de ce qui se donne d'emblée comme possédant une structure grammaticale élémentaire. Dans la modélisation des phénomènes linguistiques, c'est donc le « grammatical » qui joue pour lui un rôle analogue à celui que joue, par exemple chez Nicholas Rashevsky, le « physiologique » ou le « métabolique ». Chomsky ne modélise pas directement le *sens* de la phrase dans sa *construction intégrale ab initio*. Son modèle prend tout de même en compte le *sens grammatical* dans sa *constitution,* mais il est vrai seulement au titre de point aveugle persistant dans toute transformation équivalente et décomposante de la phrase par la grammaire. Ainsi, écrit-il que « les phrases noyaux sous-jacentes à une phrase donnée peuvent être considérées en un sens comme les 'éléments de contenu élémentaire' à partir desquels cette phrase est construite »[2]. Il commente ce propos : « Autrement dit, un résultat de l'étude formelle de la structure grammaticale est d'amener au jour un cadre syntaxique qui peut supporter l'analyse sémantique. »[3] C'est donc la prise en compte du *sens* sous une forme séminale toujours déjà donnée et le refus de tenter de le voir émerger mécaniquement de règles constitutives intégrales qui va ensuite logiquement susciter le problème de l'incarnation, de l'acquisition ou de l'innéité psychologique de telles « grammaires de transformation » chez l'homme[4].

On pourrait enfin et également rapprocher cette épistémologie non-réductionniste de l'épistémologie organiciste de Waddington notamment lorsque ce dernier refuse d'attendre les résultats de la biologie moléculaire pour proposer une théorie du développement organique. De façon assez semblable, Chomsky écrit en 1957 : « Je pense que la conception selon laquelle la théorie syntaxique doit attendre la solution des problèmes de la phonologie et de la morphologie est insoutenable […] ; et je pense qu'elle est entretenue par une analogie erronée entre l'ordre de développement de la théorie linguistique et l'ordre présumé des opérations dans la découverte de la structure grammaticale. »[5]

---

[1] Voir la définition détaillée d'une « transformation grammaticale » *in* [Chomsky, N., 1957, 1969, 1979], pp. 52-53.
[2] [Chomsky, N., 1957, 1969, 1979], p. 123.
[3] [Chomsky, N., 1957, 1969, 1979], p. 123.
[4] Assez cohérent avec lui-même sur ce point, on sait que Chomsky va refuser jusqu'au bout de se faire une représentation de la genèse du sens et de la compréhension dans l'esprit humain puisqu'il va concevoir une sorte d'innéité pour sa « grammaire profonde ». Voir [Chomsky, N., 1965, 1971], pp. 69-90 : « §8 - Théorie linguistique et apprentissage ». Voir également la célèbre confrontation avec Piaget sur cette question *in* [Piattelli-Palmarini, M., 1975, 1979], *passim*.
[5] [Chomsky, N., 1957, 1969, 1979], p. 68. À comparer avec [Waddington, C. H., 1962], p. vii. Dans les deux cas, les auteurs refusent d'admettre qu'il faille « attendre » que la discipline de niveau plus fin (micro) ouvre la voie à leurs théories et à leurs modèles.

ANNEXE D

Caractéristiques de la « HP 9820 »

Ce n'est pas avec la série 9820 que HP commence sa diffusion de calculateurs programmables. Depuis le milieu des années 1960, en effet, avec sa première série de calculateurs, les HP 9100, la firme américaine propose déjà une prise en charge des expressions arithmétiques complexes, avec la notation polonaise inversée, cela au moyen de registres d'opérandes. De plus, des programmes incluant essentiellement des conditionnelles (IF…THEN…) avec cinq niveaux de sous-routines peuvent être écrits lignes à lignes et mémorisés[1]. Mais ce qui est tout à fait nouveau dans la série 9820 tient au fait qu'elle présente un calculateur de bureau entièrement algébrique. C'est-à-dire que le rapport que l'on entretient avec la machine n'oblige plus l'utilisateur à abandonner sans cesse ses notations mathématiques formelles ou algébriques familières pour les rendre opératoires dans la machine : un compilateur[2] est intégré. On peut donc converser avec elle en gardant dans ce dialogue les notations usuelles : parenthèses, règles implicites usuelles sur l'ordre des calculs. Même en mode direct, c'est-à-dire non programmé, c'est désormais la machine qui s'occupe d'interpréter la formulation du calcul en notation inverse polonaise (RPN). Ainsi, grâce à un interpréteur, elle peut aisément rappeler à l'écran, c'est-à-dire décompiler, ce qu'elle a auparavant mémorisé sous format RPN. Les fonctionnalités de programmation sont également considérablement étendues. On y trouve de nouvelles instructions : « ENT » grâce à laquelle l'utilisateur du programme peut entrer une valeur[3] sans qu'il lui soit nécessaire d'arrêter le programme pour intervenir directement dans la liste (ou listing), « PRT » commande une impression de résultat sur l'unique ligne de 16 LEDs (diodes électroluminescentes) de l'écran[4], « GTO » commande un saut conditionnel (ou non) qui peut renvoyer à un numéro de ligne ou à un label, la flèche « → » commande l'assignation d'une valeur au contenu d'un registre même si ce qui précède la flèche est une expression algébrique complexe encore à évaluer et faisant intervenir d'autres registres mémoires (exemple : « 2 + 4.A → C »). Enfin, une des grandes nouveautés de cette machine est la référence indirecte puisqu'on y trouve

[1] En 1968, le journal interne de HP s'exprime précisément en ces termes : « Maintenant nous disposons d'une nouvelle et puissante machine à calculer de bureau. Notre modèle 9100 A est davantage un ordinateur [*computer*] qu'un calculateur [*calculator*]. Il se pourrait bien que cela soit le « Premier Mot » d'une nouvelle lignée de machines à calculer [*calculating machines*] », [Hicks, D., 1995-2002], www.hpmuseum.org/hp9100.htm, p. 4. La politique de HP est donc de développer des calculateurs programmables de bureau accessibles à un plus grand nombre de professionnels non spécialisés en électronique ou dans le calcul numérique. Il ne s'agit pas d'une préfiguration du PC (*Personal Computer*) d'IBM car cette orientation particulière a ensuite poussé HP à miniaturiser ces machines programmables pour donner naissance aux calculettes programmables de poche et à courant continu (donc fonctionnant sur batteries ou piles) de type HP 35 puis HP 65. Au début des années 1970, les machines HP 9100 et 9800 sont conçues pour être d'abord des machines programmables certes, mais essentiellement à des fins de computations, donc des *computers* au sens strict.

[2] Un compilateur est un langage qui permet de traduire ce que l'on écrit sur la machine en langage évolué (c'est-à-dire un langage synthétique et formulaire) en un « langage machine », c'est-à-dire en un langage qui se trouve compréhensible et exécutable parce qu'il est lui-même assez directement traduisible en des états électroniques non ambigus. À partir de la fin des années 1950, le langage évolué le plus fréquent est le FORTRAN. Sur le FORTRAN, sa naissance en 1957 et son devenir, voir [Ramunni, G., 1989], pp. 160-163.

[3] C'est l'équivalent de l'instruction « INPUT » en BASIC.

[4] C'est l'équivalent de l'instruction « PRINT » en BASIC.

des registres R(i) numérotés de R(0) à R(172). Les registres R(i) et leurs contenus peuvent donc être appelés ou modifiés en fonction d'une expression encore à évaluer par le calcul (exemple : « R (2+4.A) → C »). Ces deux dernières propriétés, en particulier, justifient l'appellation de « calculateur pleinement algébrique » employée par HP pour désigner sa nouvelle machine. À titre indicatif, pour son programme de synthèse finale de 1976 (d'une longueur totale de 26 lignes[1]), de Reffye se sert de 11 registres mémoires alors que les machines Monroe de l'époque, même si elles peuvent proposer en accès direct plusieurs fonctions mathématiques transcendantes assez complexes, ne présentent au mieux que deux registres mémoires et ne sont pas programmables. C'est bien en outre le caractère programmable de ces machines électroniques de bureau qui leur permet de servir à la conception de modèles de simulation. Comme nous l'avons vu, la programmabilité ajoute en effet la gestion d'opérations logiques à celle des opérations arithmétiques. Des modèles faiblement mathématisés, c'est-à-dire le plus souvent non analytiques, peuvent donc être supportés par de telles infrastructures[2].

[1] Il est publié dans l'article de 1976 sur une seule demi-colonne. Voir [Reffye (de), Ph. et Snoeck, J., 1976].

[2] Les chercheurs en recherche opérationnelle avaient pris conscience de cette nouveauté et de ses avantages dès le début des années 1960, cela même en France, notamment sous l'impulsion de ces spécialistes en mathématiques descriptives qu'étaient M. Girault et G. Th. Guilbaud, professeurs à l'Institut de Statistique de l'Université de Paris ou A. Kaufmann, professeur à l'Université de Louvain, ainsi que des ingénieurs comme J.-P. Boss, ingénieur-conseil auprès de la Compagnie des Machines Bull, A. Le Garff d'abord conseiller informatique auprès de l'Etablissement de Recherche et d'Activité Pétrolière, puis ingénieur chargé du traitement de l'information chez ELF-Aquitaine, ou encore Robert Faure, ingénieur chez Bull, puis professeur au Conservatoire National des Arts et Métiers : « Nous avons dit plus haut que c'est l'apparition des calculateurs électroniques qui avait répandu l'emploi des méthodes de simulation en économie. Sans entrer dans les détails de fonctionnement de ces machines, nous voudrions justifier ici cette assertion. Ce qui caractérise un modèle de simulation économique c'est l'intervention, en plus des opérations arithmétiques habituelles, d'un très grand nombre d'opérations logiques », [Faure, R., Boss, J.-P. et Le Garff, A., 1960, 1967], p. 101.

Table des encadrés

L'analyse ou réduction de la variance 46
La loi de Jean-Léon Poiseuille (1799-1869) 83
Le système axiomatique biologique « (P, T, org, U, etc.) » 122
Le formalisme du modèle chimico-mathématique 145
Les modèles à compartiments 191
La théorie des graphes 209
La théorie des catégories 230
Organigramme simplifié de la « synthèse globale de la croissance du caféier » 423
Rappels de « résistance des matériaux » 427
La génération de nombres pseudo-aléatoires et la méthode la transformation inverse 442
La loi de Pareto 450
La technologie du HP 9825 457
Rappel de la théorie des files d'attente 466
Structuration et institutionnalisation de la biologie théorique en France (1975 – 1981) 490
Naissance de la synthèse d'images et naissance du NYIT 527
Synthèse d'images et fractales : engouement puis scepticisme 530
SIMULA, Langages C et C++ : programmation et modélisation orientées OBJET 539
Discrétisation de l'espace et erreur systématique 553

Index des noms

Abelson, H., 588, 589, 590, 593
Abir-Am, P., 114
Abunawass, A. M., 362
Acot, P., 726
Adami, C., 155
Althusser, L., 275, 276, 277, 278, 279, 282, 283, 701, 710, 719, 751, 756, 759, 761, 762, 781, 792, 793, 806
AMAP, 22, 479, 537, 539, 541, 543, 544, 545, 546, 547, 551, 554, 555, 556, 557, 559, 561, 562, 563, 565, 566, 567, 568, 569, 570, 571, 572, 573, 574, 575, 576, 577, 578, 580, 582, 583, 584, 585, 587, 590, 591, 592, 593, 594, 595, 596, 597, 598, 600, 602, 606, 607
Andrieu, B., 595, 596, 601
Aono, M., 532, 533, 536, 543, 544, 545
Apter, M. J., 323, 324, 325, 329, 334, 350
Aristote, 76, 77, 86, 104, 120, 126, 270, 763, 779, 800
Aron, R., 17, 496, 775
Ashby, W. R., 322, 324, 326, 329
Atlan, H., 244, 271
Austin, J. L., 754
Bachelard, G., 18, 61, 275, 276, 277, 278, 282, 414, 701, 704, 709, 710, 718, 729, 732, 734, 751, 752, 756, 757, 758, 759, 760, 762, 764, 765, 766, 771, 772, 774, 790, 792, 793, 797, 798, 804, 805
Bachmann, K., 601
Badiou, A., 275, 278, 279, 282, 710, 719, 756, 761, 762, 792, 793, 806
Balaceanu, C., 269, 270, 271
Balintfy, J. L., 196, 197, 199, 440, 441, 442, 443, 452, 454, 455, 504
Barczi, J. -F., 576, 598
Bar-Hillel, 295, 296
Barker, S. B., 238, 368, 369, 370
Barthélémy, D., 32, 480, 488, 538, 556, 557, 558, 562, 572, 575, 585, 586, 587, 600
Bartlett, M. S., 197, 198
Baskin, T. I., 359
Bauer, P. S., 85
BCL, 295, 296
Beaumont, J. H., 412, 413
Beemster, G. T., 359
Bejan, A., 112
Bell, A. D., 179, 533, 540, 591, 592
Bensene, R., 424
Benzécri, J. P., 210, 397, 410, 518
Berge, C., 209, 210
Bergson, H., 44, 244, 252, 569, 768
Bernard, C., 30, 67, 105, 254, 260, 279, 281, 383, 795
Bertalanffy (von), L., 57, 58, 59, 65, 188, 204, 220, 268, 717, 723
Besançon, A., 532, 770
Bichat, H., 477, 516, 517, 520, 521, 522, 523, 536, 545, 577
Birot, Y., 561, 562, 574
Blackith, R. E., 197, 198
Blaise, F., 1, 82, 432, 529, 538, 541, 546, 547, 548, 549, 550, 551, 552, 553, 554, 555, 556, 557, 559, 562, 574, 575, 582, 585, 586, 587, 590, 597, 602
Bonnet, C., 26, 27, 28, 31
Bonneuil, C., 385, 386, 387
Borchert, R., 376
Borel, E., 37, 175, 210
Boss, J. P., 463, 466, 467, 820
Bouchon, J., 32, 251, 532, 538, 560, 561, 562, 563, 564, 565, 566, 567, 568, 569, 570, 571, 572, 573, 574, 575, 576, 578, 579, 584
Bourbaki, N., 127, 158, 431, 712, 762
Boutot, A., 110, 247, 249, 250, 531
Bouveresse, J., 707, 712, 714, 769, 800, 810
Brenner, A., 383, 754
Bresenham, J. E., 553, 582
Breton, P., 142, 762
Brillouin, L., 243, 728, 762, 764, 777
Broglie (de), L., 765, 775
Bru, B., 210, 256
Bruaire, C., 770, 809
Bruckner, P., 762
Buck-Sorlin, G. H., 601
Burian, R. M., 52, 67, 383
Burks, A. W., 154, 158, 163, 167, 171, 323, 362
Cadoz, C., 527
Candolle (de), A., 28

Canguilhem, G., 83, 196, 275, 277, 702, 706, 707, 709, 710, 749, 756, 760, 761, 792, 793, 796, 804, 807
Capot, J., 389, 390, 391, 425, 456, 460, 477
Carnap, R., 94, 95, 96, 97, 98, 115, 116, 120, 121, 125, 126, 154, 178, 208, 295, 318, 319, 324, 326, 348, 754, 813
Cassirer, E., 27
Cavaillès, J., 530, 751, 774, 790, 807
CGL, 527, 528, 531, 552
Chazal, G., 153, 793
Chen, J., 310
Cheruy, A., 192
Child, C. M., 147, 148, 187, 297
Chomsky, N., 321, 346, 347, 349, 351, 812, 814, 815, 816, 817, 818
Chorafas, D. N., 445
CIRAD, 7, 12, 15, 18, 22, 253, 286, 293, 375, 384, 479, 521, 522, 535, 536, 537, 544, 545, 546, 547, 551, 559, 560, 561, 562, 563, 565, 566, 568, 570, 571, 572, 573, 575, 576, 577, 578, 580, 582, 584, 590, 597, 598, 600, 607
Closkey, J.F.Mc, 140, 463
CNRS, 7, 16, 52, 67, 188, 198, 252, 280, 385, 426, 432, 491, 521, 524, 536, 537, 541, 544, 575, 597, 600, 787, 792, 804
Cohen, D., 184, 295, 296, 297, 298, 299, 300, 301, 302, 305, 309, 315, 316, 322, 328, 330, 331, 334, 338, 339, 346, 362, 363, 364, 367, 373, 435, 512
Cohn, D. L., 13, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 127, 136, 206, 220, 222, 234, 238, 304, 526, 601
Cole, K. S., 92, 93, 131, 192
Coléno, A., 417, 517, 518, 559, 560, 561, 562, 563, 572, 573, 575, 576, 584, 600
Colin, F., 574
Collot, F., 242, 243, 244, 245, 246, 490, 495
Comfort, J. C., 374, 375
Comte, A., 4, 75, 142, 274, 721, 763
Cooper, N. G., 167, 168
Coquillard, P., 433, 511, 540, 550, 551, 556
Corner, E. J. H., 27, 31, 480, 481, 484
Coste, R., 386, 387, 388, 434
Costes, E., 537, 549, 557, 572, 573, 575
Couffignal, L., 70, 141, 252, 270, 271, 284, 525, 796
Coulibaly, N., 461, 462, 465, 466, 467, 468, 469, 470, 473
Cournot, A. A., 352, 719, 725, 763
Cousin, R., 379, 383
Cox, D. R., 418, 557
Cumming, G., 238, 368, 369, 370
Curien, H., 521
Dagognet, F., 330, 756, 757, 767, 768, 769, 770, 771, 772, 773, 774, 777, 778, 781, 784, 785, 791, 800, 802, 804, 809
Dahan-Dalmedico, A., 140, 142
Dahl, O. J., 539, 540, 541
Damien, R., 291, 770, 771
Danchin, A., 792
Dantzig, G. B., 190, 196
Dattée, Y, 396, 401, 402, 516
Dauzat, J., 580, 581, 582, 591, 592, 595, 772
Debray, R., 773
Delattre, P., 244, 490, 491, 701, 765
Deléage, J. P., 56, 140, 273, 484, 726, 727, 728, 729, 730, 731
Deleuze, Ch., 585
Deleuze, G., 791
Demarly, Y., 379, 396, 401, 402, 477, 478, 479, 516
Desanti, J. T., 279, 431, 762, 790
Descartes, R., 4, 119, 162, 243, 274, 366, 706, 763, 764, 782, 794
Desrosières, A., 36, 39, 43, 45
Dilthey, W., 496, 775
Dinouard, P., 557, 558, 577
Dosse, F., 762, 763, 780, 801
Dreyfus, Ph., 322
Drogoul, A., 541
Drouin, J. M., 726
Duhem, P., 5, 277, 710, 711, 721, 724, 727, 756, 758, 759, 760, 792
Dumas, R., 26, 545
Dzierzon, H., 594
Edelin ,C., 480, 484, 488, 531, 534, 537, 539, 545, 547, 549
Eden, M., 173, 174, 175, 176, 177, 179, 180, 181, 182, 183, 184, 186, 187, 250, 291, 293, 296, 297, 298, 299, 300, 301, 302, 322, 325, 326, 328, 331, 334, 335, 346, 363, 435, 527
Einstein, A., 7, 21, 94, 208, 237, 752
Ekeland, I., 392
Elguero, E., 557, 594
Engels, F., 68, 69, 259, 276, 793
Erickson, R. O., 316, 318, 319, 334, 353, 355, 356, 357, 358, 359, 360

Essad, S., 379, 380, 381, 382, 383, 396, 401, 402, 477, 479
Faraday, M., 51, 185, 707, 708, 709, 710, 714, 715
Fatès, N., 153
Faure, R., 463, 466, 467, 820
Feltz, B., 803
Fisher, J. B., 365, 367, 368, 370, 371, 372, 374, 375, 376, 506, 533
Fisher, R. A., 36, 37, 38, 39, 40, 42, 43, 46, 48, 49, 50, 53, 94, 133, 175, 198, 256, 296, 311, 357, 387, 397, 445, 466, 502
Fleury, V., 601, 602, 603
Foerster, (von), H., 295, 298, 300, 324
Forrester, J. W., 196
Fourcaud, T., 556, 574, 585, 586, 587
Fournier, C., 595, 596, 601
Françon, J., 523, 524, 525, 526, 527, 528, 529, 530, 531, 532, 533, 534, 535, 536, 537, 538, 541, 545, 547, 548, 553, 554, 555, 576, 578, 590
Franquin, P., 494, 495
Fréchet, M., 210, 213, 256
Frege, G., 95, 117, 783
Freud, S., 114, 757, 768, 769, 778, 796
Freudenthal, H., 486
Gafiychuk, V.V., 82, 84, 85, 86
Galilée, 4, 75, 279, 378, 534, 732, 757
Galison, P., 153, 161, 163, 168, 184, 197, 442, 570, 702, 734, 735, 739, 740, 741, 742, 743, 744, 745, 746, 747, 748, 749, 753
Garaudy, R., 759, 805, 809
Garfinkel, D., 189, 190, 192, 195, 196, 201, 202, 203, 310
Gastinel, N., 188, 541
Gaudillière, J. P., 383, 384
Gautier, C., 192
Gayon, J., 52, 53, 64, 67, 199, 296, 383
Giegerenzer, G., 38, 67, 397, 400
Girault, M., 463, 464, 467, 820
Givernaud, N., 53, 64
Godin, C., 576, 587, 593, 594, 597
Goethe (von), J. W., 27, 28, 31, 484, 485
Golomb, S., 182
Goodwin, B. C., 340, 341, 342, 344
Gorenflot, R., 28, 32, 33
Gosset (*alias* 'Student'), W. S., 39, 42, 46, 54, 288
Goudot-Perrot, A., 271
Goujon, P., 153, 154, 167, 204, 295, 589
Goursat, M., 598, 599
Granger, G. G.., 178, 514, 606, 756, 757, 762, 772, 774, 775, 776, 777, 778, 779, 780, 781, 782, 783, 784, 797, 800, 804, 808, 811
Greene, N., 552
Gregg, J. R., 114, 115, 116, 121, 128, 319, 322, 323
Grew, N., 26
Guédès, M., 28, 31
Guédon, Y.,, 538, 576, 587
Guilbaud, G. Th., 210, 256, 463, 820
Guillevic, P., 582
Guyon, E., 795
Habermas, J., 754
Hacking, I., 399, 739, 740, 744, 745
Hallé, F., 26, 252, 375, 478, 479, 480, 481, 482, 483, 484, 485, 486, 487, 488, 489, 494, 496, 498, 500, 514, 516, 537, 538, 539, 543, 544, 546, 547, 558, 559, 571, 572, 573, 602
Halle, M., 177, 178, 179, 180, 181, 182, 296, 346, 816
Harman, P. M., 707, 709, 710
Harris, F. T. C., 114, 115, 116, 128, 319, 322
Harris, T. E., 193, 466
Hatta, H., 376
Hegel, G.W.F., 4, 276, 760, 770, 773, 776, 779, 780, 799, 801, 805, 806, 807, 808, 809, 810
Heinmets, F., 193, 194, 195
Hempel, C., 98, 779
Herman G. T., 184, 344, 345, 348, 350, 741, 742
Hertz, H. R., 185, 708, 710, 713
Hesse, M. B., 342, 766
Hill, D. R. C., 433, 511, 540, 550, 551, 556
Hodges, A., 143, 147
Hofmeister, W., 30, 79, 133, 147, 297
Holland, J. H., 143, 362
Holton, G., 750, 751, 752, 753
Honda, H., 362, 363, 364, 365, 366, 367, 368, 370, 371, 372, 373, 374, 375, 376, 435, 477, 506, 512, 513, 515, 533
Horsfield, K., 238, 368, 369, 370
Houllier, F., 310, 410, 545, 561, 564, 566, 567, 573, 574, 575, 576, 577, 582, 583, 584, 585, 586, 587, 598, 599, 600
Hu, B. G., 598, 599
Hume, D., 74, 75
Husserl, E., 745, 751, 793

Huxley, J. S., 53, 64, 66, 126, 148, 192, 297, 304, 355, 413
Hyppolite, J., 805, 808, 809
INRA, 7, 16, 256, 258, 259, 260, 280, 379, 383, 478, 490, 500, 517, 518, 520, 521, 522, 546, 559, 560, 561, 562, 563, 565, 566, 567, 568, 570, 571, 572, 573, 574, 575, 576, 577, 578, 582, 584, 585, 595, 596, 598, 600
INRIA, 366, 545, 554, 582, 596, 597, 599, 600
Israel, G., 88, 92, 140, 188, 701, 702, 731, 732, 733, 734, 735, 736, 737, 738, 739
Jacob, F., 94, 117, 118, 119, 193, 308, 341, 383, 497, 795
Jacob, P., 94, 117, 118, 119, 308, 341, 383, 497, 795
Jadin, P., 406
Jaeger, M., 531, 534, 536, 537, 538, 539, 541, 542, 543, 544, 545, 546, 547, 548, 557, 574, 576, 578, 590
Jagoret, P., 384, 386
Jakobson, R., 177, 178, 179, 180, 182, 346, 812, 816
Jean, R. V., 26, 27, 28, 29, 31, 32, 133, 244, 245, 246, 265, 495, 602
Johanssen, 31
Juglas, J. J., 384, 386, 387
Kang, M. Z., 598
Kant, E., 4, 119, 277, 534, 732, 749, 750, 779, 783, 800, 801, 806, 807
Kaufman, A., 463
Kaufman, S., 463
Keilling, J., 560
Keller, E. F., 89, 100, 102, 128, 206, 252, 323, 350, 512, 704
Kelvin (Lord), 190, 708
Kingsland, S. E., 55, 91, 92, 140, 700, 702, 716, 717, 718, 719, 720, 721, 722, 723, 724, 725, 726
Köhler, P., 94, 414
Kojève, A., 805, 809
Kostitzin, V. A., 242, 243
Koyré, A., 702
Kuhn, T., 705, 736, 739, 751
Kunii, T. L., 532, 533, 536, 543, 544, 545
Kuntzman, J., 188, 541
Kurth, W., 591, 592, 593, 594, 595, 596, 602, 607
Labarrière, P. J., 805, 809
Laborit, H., 271, 272, 281
Ladrière, J., 803
Lagarde (de), J., 392, 411, 418
Lakatos, I., 700
Langton, Ch. G., 589
Laplace(de), P. S., 38, 162, 732
Largeault, J., 705
Lassègue, J., 143, 144, 149, 150
Latil (de), P., 270, 271, 274
Latour, B., 255, 430, 701, 762, 763, 770, 798, 799, 801, 802, 804
Laugier, S., 95
Lavendhomme, R., 165, 229, 230
Le Dimet, F. X., 585, 587
Le Douarin, N., 109
Le Garff, A., 463, 466, 467, 820
Le Guyader, H., 491
Le Lionnais, F., 158, 213
Leban, J.M., 574, 575
Lebreton, J. D., 192, 193, 279
Lecourt, D., 67, 275, 282, 719, 751, 758, 790, 792, 793, 807
Lecoustre, R., 517, 537, 546, 577, 581
Ledley, R. S., 189, 190, 200
Lefebvre, H., 759, 760, 793, 805, 809
Legay, J. M., 98, 106, 141, 191, 192, 194, 254, 255, 256, 257, 258, 259, 260, 261, 262, 263, 264, 265, 266, 267, 268, 269, 271, 272, 273, 274, 275, 279, 280, 281, 282, 284, 285, 286, 287, 288, 289, 291, 490, 498, 499, 500, 501, 518, 538, 547, 556, 560, 567, 569, 573, 608, 790, 793, 794, 796
Lehmer, D. H., 442, 443
Lemaître, J., 426
Lénine, V. I., 69, 276, 277, 282, 727, 793
Leopold, L. B., 239, 240, 241, 368, 369, 370, 492
Leslie, P. H., 192, 193, 446, 466
Lesourne, J., 491
Lévènez, E., 188, 196
Lévi-Strauss, C., 182, 276, 704
Lévy, P., 154, 704, 731, 732, 787, 788, 789, 790, 791, 811
Lévy-Leblond, J. M., 731, 732
Lienhardt P., 576
Lindenmayer, A., 128, 234, 266, 315, 316, 317, 318, 319, 320, 321, 322, 323, 325, 326, 327, 328, 329, 330, 331, 332, 333, 334, 336, 337, 338, 339, 340, 341, 342,

343, 344, 345, 346, 347, 348, 349, 350, 351, 352, 353, 354, 355, 357, 358, 359, 360, 362, 364, 365, 491, 496, 498, 528, 529, 533, 543, 578, 583, 587, 589, 590, 592, 593, 607, 608, 736, 804, 812, 816, 817
Linné, C., 27, 28, 31
Loeb, J., 54, 57, 90
Lotka, A. J., 56, 88, 90, 91, 92, 94, 99, 100, 104, 109, 122, 140, 188, 193, 208, 211, 242, 243, 417, 432, 467, 526, 717, 718, 719, 720, 722, 723, 724, 726, 727
Lotodé, R., 405, 406, 407
Lucas, P., 29, 437, 438, 439, 440, 443, 444, 445, 446, 447, 448, 450, 451, 452, 454, 455, 456, 471, 476
Lück, H. B., 317, 352, 353, 354, 355, 356, 358, 359, 360, 364, 491, 496, 593
Luquet, D., 582
Lyotard, J. F., 757, 772, 806
Mach, E., 5, 41, 43, 76, 115, 121, 141, 276, 711, 713, 721, 727
Machover, C., 527
Mackenzie, D. A., 36
Malécot, G., 261, 263, 265, 267
Mandelbrot, B., 530, 531, 532, 588, 757
Marshall, A. W., 191, 455
Marticou, H., 404, 405
Marx, K., 259, 276, 278, 757, 762, 779, 781, 808
Maxwell, J. C., 51, 185, 356, 378, 426, 591, 707, 708, 709, 710, 714, 715, 731, 745, 758
Mayr, E., 497
Mayrat, A., 132
McCulloch, W. S., 101, 154, 196, 206, 233, 308, 323, 325, 340
Mendel, 31, 208, 398
Metropolis, N., 154, 163, 164, 168, 197, 442, 455, 740, 741
Mickulecky, D. C., 225
Milcou, S. M., 269, 270
Minc, A., 285, 521
MIT, 174, 175, 176, 177, 181, 184, 188, 189, 190, 196, 296, 309, 340, 348, 366, 527, 588, 589, 592, 813
Mondzain, M. J., 283
Monod, J., 60, 193, 308, 324, 341, 383, 497
Monod, J. C., 804
Morange, M., 34, 60, 206, 308, 383, 384
Morgan, M. S., 260, 707, 754
Morowitz, H. J., 129, 131, 135
Morrison, M., 707, 754
Mosconi, J., 153
Mounin, G., 177, 178, 179, 812, 813, 814
Mourgues, C., 259, 260, 261, 262
Murray, C. D., 79, 81, 82, 83, 84, 85, 111
Murray, J. D., 146
Nadeau, R., 76, 95
Nagel, E., 779
Nancy, J. L., 773
Naylor, T. H., 196, 197, 199, 440, 441, 442, 443, 452, 454, 455, 504
Neumann (von), J., 94, 142, 150, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 161, 163, 164, 166, 167, 169, 172, 175, 186, 195, 196, 197, 206, 221, 223, 224, 233, 300, 323, 325, 329, 348, 349, 362, 365, 442, 455, 589, 735, 736, 740, 741, 742, 795, 797
Nicolis, G., 146
Nietzsche, F., 769, 799, 800, 801, 804, 809, 810
NIH, 108, 176, 189, 204
Niklas, K. J., 601
Nora, S., 285, 521
Nosenzo, R., 585, 587
Nouvel, P., 790
Novoplansky, A., 601, 602
Nygaard, K., 539, 540, 541
Odum, E. P., 273, 727
Odum, H. T., 727, 728
Oldeman, R. A. A., 252, 375, 478, 479, 480, 481, 482, 483, 484, 485, 486, 487, 488, 489, 496, 498, 500, 514, 538, 539, 543, 571, 572, 602
Oppenheimer, P. E., 531, 532
Orange, C., 765
Ortigues, E., 431
Ottorini, J. M., 560, 575
Parrochia, D., 122, 709, 757, 760, 765, 770, 792, 793, 794, 795, 796, 797, 798, 811
Parvais, J. P., 437, 438, 439, 440, 444, 445, 446, 447, 448, 450, 451, 452, 454, 455, 456, 460, 461, 462, 465, 466, 467, 468, 469, 470, 471, 473, 476
Pasta, J. R., 169
Patten, B. C., 273
Pauly, P. J., 57, 82, 90
Pavé, A., 192, 210, 256, 573, 577, 597, 600
Pearson, K., 37, 39, 41, 43, 44, 45, 141, 261, 400, 720, 721, 722, 723, 727
Perrin, J., 766

Perttunen, J., 593
Petitot, J., 27, 110, 247, 249, 250
PIAF, 566, 585, 595
Piaget, J., 274, 588, 590, 818
Picard, J. F., 16, 52, 252, 258, 385
Pichot, A., 30
Pinel, E., 244, 490
Pitts, W., 101, 154, 196, 206, 233, 308, 318, 323, 325, 326
Pochat, R., 574
Poincaré, H., 5, 76, 77, 103, 159, 209, 210, 243, 724, 727
Poiseuille, L., 82, 83, 85, 112, 318
Polya, G., 159, 405
Popper, K.., 116, 300
Pouget, J. M., 27, 28
Pratt, V., 190, 199
Prenant, M., 57, 62, 65, 67, 68, 69, 115, 191, 242, 297, 367, 608, 755
Prigogine, I., 146, 244, 491, 569
Pring, M., 190, 195, 197
Proulx, S., 142, 762
Proust, J., 752, 780
Prusinkiewicz, P., 350, 351, 588, 589, 590, 591, 592, 593, 596, 601, 602, 606, 607, 804
Puech, C., 531, 534, 536, 537, 545, 578
Quadrat, J. P., 598, 599
Quastler, H., 204, 206, 268
Quéau, P., 757, 774, 784, 785, 786, 787, 796, 797, 804
Ramunni, G., 143, 153, 154, 155, 176, 188, 190, 252, 284, 366, 426, 457, 491, 710, 819
Rashevsky, N., 72, 73, 81, 82, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 112, 113, 120, 121, 122, 127, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 146, 148, 154, 199, 205, 206, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 218, 219, 220, 222, 223, 224, 225, 226, 227, 229, 232, 233, 234, 235, 236, 237, 244, 245, 246, 248, 250, 254, 263, 264, 265, 266, 267, 270, 285, 286, 287, 288, 289, 303, 304, 305, 307, 313, 320, 323, 324, 327, 493, 495, 498, 500, 526, 590, 601, 608, 753, 818
Reffye (de), Ph., 132, 286, 378, 379, 380, 381, 382, 383, 384, 390, 391, 392, 393, 394, 395, 396, 397, 398, 399, 400, 401, 402, 403, 404, 407, 408, 409, 410, 411, 412, 413, 414, 415, 416, 417, 418, 419, 420, 421, 422, 423, 424, 425, 426, 427, 428, 429, 430, 432, 433, 434, 435, 436, 437, 438, 439, 440, 443, 444, 445, 446, 447, 448, 449, 450, 451, 452, 453, 454, 455, 456, 458, 459, 460, 461, 462, 464, 465, 466, 467, 468, 469, 470, 471, 472, 473, 474, 475, 476, 477, 478, 479, 480, 484, 485, 486, 489, 490, 492, 493, 494, 495, 496, 497, 498, 499, 500, 501, 502, 503, 504, 505, 506, 507, 508, 509, 510, 511, 512, 513, 514, 515, 516, 517, 518, 520, 522, 523, 531, 532, 533, 534, 535, 536, 537, 538, 539, 543, 544, 545, 546, 547, 548, 549, 550, 556, 557, 558, 559, 560, 561, 562, 563, 572, 573, 574, 575, 576, 577, 578, 579, 580, 581, 582, 583, 584, 585, 586, 587, 590, 592, 596, 597, 598, 599, 603, 605, 607, 772, 820
Reichenbach, H., 441
Renault, E., 806, 807
Reveilles, J. P., 553, 554
RFF, 543, 574
Rivals, P., 557
RLE, 296, 309, 340
Robins, R. H., 179, 812, 814
Roger, J., 36
Roll-Hansen, N., 114, 116, 118
Rosen, R., 31, 103, 133, 145, 154, 212, 219, 220, 221, 222, 223, 224, 225, 226, 227, 228, 229, 230, 231, 232, 233, 234, 235, 236, 245, 250, 252, 265, 267, 303, 305, 307, 308, 313, 320, 325, 326, 327, 328, 355, 526
Rosenblueth, A., 141, 142, 149
Rosnay (de), J., 271
Rozenberg, G., 345, 348, 349
Ruse, M., 114
Russell, B., 95, 115, 116, 117, 118, 120, 121, 125, 154, 318, 326, 329
Sache, A., 209, 210
Sachs (von), J., 32
Sachs, T., 601
Saint-Sernin, B., 118, 119, 120, 705
Salanskis, J. M., 806
Sartre, J. P., 752, 762
Sauvan, J.., 141, 271, 281, 284, 538, 796
Savary, A., 521
Schmid, A. F., 255, 257, 260, 273, 274, 755, 811

Schmitt, S., 28, 533
Schrandt, R. G., 170, 171
Schreider, E., 50
Schrödinger, E., 165
Segal, J., 36, 37, 39, 140, 141, 167, 269, 284, 295, 764
Serres, M., 255, 271, 757, 762, 763, 764, 770, 772, 777, 779, 784, 789, 791, 801, 804
Sheppard, C. W., 191
SIGGRAPH, 528, 531, 536, 545
Silk, W. K., 357, 359
Sillion, F., 582
Simon, H. A., 722
Simondon, G., 430
Skellam, J. G., 280
Slobodkin, L. B., 280
Smith, A. R., 527, 528, 529, 530, 539, 588
Snoeck, D., 404
Snoeck, J., 404, 408, 409, 410, 411, 412, 413, 414, 417, 418, 420, 421, 422, 423, 424, 425, 456, 460, 474, 475, 476, 477, 478, 820
Soler, C., 582
Sommerhoff, G., 324
Stacy, R. W., 189, 203, 204
Stahl, W. R., 13, 303, 304, 305, 306, 307, 308, 309, 310, 311, 312, 313, 314, 315, 321, 323, 324, 325, 326, 327, 328, 335, 343, 609
Stein, P. R., 167, 168, 169, 171
Steiner, G., 812, 814, 815
Stengers, I., 569, 803
Stewart, I., 159, 530, 602
Suppes, P., 311, 312, 329, 754
Sutherland, I., 527, 528
Teilhard de Chardin, P., 244, 252
Teissier, G., 19, 35, 49, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 126, 137, 191, 242, 254, 256, 259, 289, 304, 305, 355, 413, 476, 490, 501, 608
Thellier, M., 491, 701, 765
Thom, R., 37, 110, 226, 234, 238, 246, 247, 248, 249, 250, 251, 252, 283, 344, 441, 469, 483, 486, 487, 488, 491, 705, 736, 739, 751
Tomassone, R., 256
Tomlinson, P. B., 375, 376, 514
Trefethen, F.N., 140, 463
Treuil, J. P., 804
Turing, A. M., 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 155, 156, 171, 172, 174, 182, 183, 184, 185, 186, 223, 303, 306, 307, 308, 312, 314, 315, 325, 329, 330, 334, 335, 344, 814
TX-2, 176, 177, 183, 296, 299, 300, 527, 528
Ulam, S., 150, 153, 154, 155, 157, 159, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 186, 187, 197, 223, 250, 300, 301, 303, 325, 326, 328, 329, 331, 334, 339, 363, 455, 551, 589, 605, 735, 740, 741, 743
Vaihinger, H., 185, 715
Vendryès, P., 244, 490
Vessereau, A., 47, 210, 256, 257, 258, 261, 397, 418
Vinci (de), L., 26, 82, 106, 493
Volterra, V., 88, 90, 91, 92, 99, 103, 104, 109, 188, 208, 242, 243, 432, 718, 722, 723, 724, 726
Waddington, C. H., 109, 110, 111, 116, 118, 125, 127, 147, 148, 150, 151, 152, 182, 206, 248, 251, 296, 297, 320, 324, 340, 341, 342, 486, 488, 818
Wagner, P., 762
Wardlaw, C. W., 27, 31, 32, 71, 90, 147, 148, 150
Waterman, T. H., 129, 131
Watson, J. D., 137, 167, 193, 206, 466
Waxman, B., 189, 203, 204
Weeks, C. L., 374, 375
Weyl, H., 117, 120, 125, 127, 158, 247
White, J., 356, 373, 502, 551, 593
Whitehead, A. N., 94, 95, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 126, 154, 164, 318, 326, 329
Wiener, N., 94, 115, 140, 141, 142, 149, 154, 180, 206, 207, 323, 324, 735, 762, 777
Wittgenstein, L., 95, 431, 712, 754, 769, 774
Wolfram, S., 153, 166
Woodger, J. H., 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 164, 208, 211, 212, 216, 217, 219, 226, 312, 316, 317, 318, 319, 320, 321, 322, 324, 326, 328, 330, 332, 344, 362, 607, 608, 749, 816
Woolgar, S., 798, 799, 801
Wright, S., 94, 168, 296, 297
Yan, H. P., 597, 598
Zamir, M., 82, 85
Zhan, Z. G., 598, 599
Zhao, X., 597

Table des matières

AVANT-PROPOS **4**

INTRODUCTION GENERALE **6**

REMERCIEMENTS **24**

PREMIERE EPOQUE : LE DERACINEMENT **25**

INTRODUCTION : LES COMMENCEMENTS 26
Morphologie et phyllotaxie géométrique *27*
La géométrie spirale : description précise mais sans explication ni application *28*
La mathématisation des formes du vivant : une curiosité *30*
La critique de toute idéalisation mathématique : les « hélices foliaires » de Plantefol *32*
CHAPITRE 1 - LA « LOI MATHEMATIQUE » HYPOTHETIQUE DE R. A. FISHER (1922) 36
La signification de la mathématisation chez R. A. Fisher *38*
Esprit étroit et information *39*
Le rôle d'un infini hypothétique dans le modèle statistique *41*
Le causalisme faible de Fisher *43*
La modélisation de la croissance des plantes selon Fisher *46*
Précision de l'indéterminisme : critique des premières formules mathématiques générales (1921) *48*
CHAPITRE 2 – LA LOI D'ALLOMETRIE : DE LA MESURE ABSOLUE A LA MESURE RELATIVE 52
Les « interprétations chimiques » *54*
Les interprétations métaboliques : Bertalanffy (1932) *57*
Les « lois élémentaires » de la croissance *60*
L'allométrie ou la « loi quantitative » de la « croissance relative » *62*
Une loi d'abord empirique, puis physiologiquement interprétée et légitimée *64*
Signification épistémologique du passage à l'allométrie *66*
Prenant et Teissier : un physiologisme dialectique *67*
Bilan : loi hypothétique et mesures relatives *70*
CHAPITRE 3 – LA BIO-« MECANIQUE » DE D'ARCY THOMPSON (1917-1942) 72
Le développement des théorisations physicalistes de la morphogenèse *72*
Les postulats de d'Arcy Thompson sur le « pouvoir » des mathématiques. *73*
Cause et analogie ne sont toutes deux que des « liens » entre les phénomènes *74*
Combiner et généraliser : la symbolisation à double effet synthétique *75*
Le « gnomon » au principe de la spirale logarithmique : la loi géométrique la plus simple *78*
La forme des feuilles et la ramification *79*
CHAPITRE 4 – LA BIO-« HYDRAULIQUE » DE CECIL D. MURRAY (1926-1930) 81
La ramification vasculaire (1926-1927) *81*
Le principe du travail minimum en physiologie morphologique *83*

« Modèle » inexpliqué ou « loi » fondée sur une « foi » en l'optimalité de la nature ?...85
CHAPITRE 5 – LA « BIOPHYSIQUE » DE NICHOLAS RASHEVSKY (1931-1954).....88
Le premier Rashevsky (1931-1948) et le projet de la « biophysique » : un réductionnisme 89
Forme et mécanisme de division de la cellule.....92
Physicalisme unitaire et convergence avec le « positivisme logique » de Rudolf Carnap 94
La période des essais tous azimuts.....97
De la mécanique de la cellule à la forme complexe des métazoaires 99
La proposition de « principes formels et généraux » 102
De deux à trois horizons de formalisation : insérer des principes intermédiaires.....103
Application à la forme des animaux puis des plantes.....105
Des résultats pas entièrement en cohérence avec l'objectif initial 106
CHAPITRE 6 - LA BIO–« PHYSIQUE D'INGENIEUR » DE DAVID L. COHN (1954).....108
Un prise de conscience venant de l'embryologie chimique.....109
L'optimisation du tout passe par l'optimisation des parties.....111
CHAPITRE 7 - L'AXIOMATISATION DE LA BIOLOGIE PAR JOSEPH HENRY WOODGER (1937) 114
Le contexte philosophique.....115
La morphologie : atomisée et logicisée 119
Carnap, Woodger et Rashevsky (1936-1938) : convergence et bifurcation.....120
La méthode axiomatique en biologie.....121
Le cas de l'embryologie : augmenter la complexité sans recourir au vitalisme.....123
Complexifier la « théorie des homologies » de d'Arcy Thompson.....126
CONCLUSION : FORMALISATIONS DE LA MORPHOGENESE AVANT L'ORDINATEUR, DERACINEMENT ET RESISTANCES.....129
La biophysique unitaire et les biophysiques régionales 129
Bilan sur les théories et les modèles de la morphogenèse avant l'ordinateur.....132
Statuts des divers formalismes avant l'ordinateur 133
Bilan général de la première époque.....137

DEUXIEME EPOQUE : LA DISPERSION 139

INTRODUCTION : LA RECONNAISSANCE DE LA « METHODE DES MODELES ».....140
CHAPITRE 8 – L'ORDINATEUR COMME CALCULATEUR NUMERIQUE : LE MODELE MATHEMATIQUE DE TURING (1952).....143
Une nouvelle machine à calculer pour un modèle de morphogenèse 143
Le modèle chimico-mathématique.....144
L'influence de l'embryologie chimique 146
La modélisation mathématique et le rôle du calculateur numérique selon Turing.....148
Réception de l'article de Turing en embryologie.....150
CHAPITRE 9 - LA SIMULATION CONÇUE COMME COMPUTATION SPATIALISEE : REPLIQUER POUR CALCULER 153
Les automates auto-reproducteurs et la première simulation numérique sur l'ENIAC.153
Modéliser n'est plus abstraire des lois mais reproduire des règles.....155
Une genèse logique sans morphogenèse chez von Neumann.....157
La réduction des mathématiques à une visualisation combinatoire chez Ulam 159
Quand le calculateur numérique est … analogique, il simule !.....162

Du stochasticisme à la spatialisation : le rôle des théorèmes sur les transformations linéaires *163*
Spatialiser les formalismes en biologie : les « systèmes de réaction binaire » *167*
Simulation spatialisée et déterministe de la croissance et de la ramification *170*
Un modèle d'accrétion *171*
Ramification à partir d'une « pousse » *172*
Bilan sur les premières simulations : un travail de mathématiciens *172*
CHAPITRE 10 – LA SIMULATION CONÇUE COMME GENERATRICE DE FORME AU HASARD . 174
Un « modèle probabiliste » de ramification *174*
Le contexte technique du Lincoln Laboratory *176*
Le Research Laboratory of Electronics et le « Groupe de Traitement de l'Information Cognitive » du MIT *177*
La rencontre féconde avec l'analyse phonologique structurale *177*
Un modèle discret des « traits de plume » pour la forme des lettres manuscrites *179*
Simulation probabiliste de la croissance d'un tissu dissymétrique *181*
Un second enjeu : estimer une formule inconnue d'analyse combinatoire *182*
Un stochasticisme biologique *184*
Bilan sur les premières simulations de la morphogenèse *184*
CHAPITRE 11 - LE *COMPUTER* EN BIOLOGIE DANS LES ANNEES 1960 : UN TOUR D'HORIZON 188
De la physique à la biologie *188*
Débuts lents et sporadiques, mais volontarisme des National Institute of Health *189*
Quatre différents usages du calculateur numérique en biologie *190*
Premier usage : la résolution d'équations différentielles, d'équations de flux ou de modèles à compartiments *190*
Deuxième usage : l'analyse statistique et la morphométrie *197*
Troisième usage : le traitement de données non numériques ou traitement d'informations *200*
Le quatrième usage : la simulation numérique représentative *201*
Bilan : une évolution quantitative et une évolution qualitative dans les rapports de la biologie aux mathématiques *203*
CHAPITRE 12 – LA « BIOTOPOLOGIE » DU SECOND RASHEVSKY (1954) 206
L'emprunt à la « théorie des graphes » : une topologie graphique *207*
Fonction mathématique et fonction biologique : la « biotopologie » ensembliste *212*
« Organisme primordial » et « propositions existentielles » *214*
« Tranches » et « propriétés » du vivant : Woodger et le second Rashevsky. *216*
Une conséquence : l'oubli de la forme *219*
CHAPITRE 13 – LA « BIOLOGIE RELATIONNELLE » DE ROBERT ROSEN (1958) 220
Des « propriétés » aux « composants » du système biologique : le système (M, R) *221*
Le jugement du maître : un « modèle topologique » *222*
L'intérêt d'une ambiguïté terminologique *225*
Application de la « théorie des catégories » à une « théorie de la représentation » des systèmes biologiques *227*
« Diagramme de blocs abstrait » et « forme canonique » du système équivalent *231*
Confirmation par la théorie des « réseaux de neurones » et la « théorie des automates » : application de la théorie des catégories et fin *233*
Reconnaissance tardive de la « modélisation mathématique » par la tradition de la biophysique théorique (1960) *234*
Une autre preuve de l'érosion de la résistance : la nature transitoire des modèles mathématiques *236*

CHAPITRE 14 – THERMODYNAMIQUE ET TOPOLOGIE DIFFERENTIELLE DES FORMES 238
Arbres fluviaux et arbres botaniques.....*238*
« Entropie généralisée » et phyllotaxie *242*
Reconnaissance de la dispersion des « modèles » *246*
Une topologie de la morphogenèse en France : Thom et le modèle conçu comme paradigme du réel (1972).....*247*
Bilan sur la biophysique, la biologie mathématique et la phyllotaxie théoriques devant l'ordinateur *252*
CHAPITRE 15 – LA DISPERSION PRAGMATIQUE ASSUMEE : L'ECOLE DE MODELISATION FRANÇAISE ET LA MORPHOGENESE 254
De la génétique à l'agronomie – 1947-1950 .....*255*
De la sélection génétique à la physiologie – 1950 –1959 .....*258*
Retour vers la génétique et la biométrie 1959-1967 .....*260*
La rencontre avec les modèles mathématiques de la biophysique : graphes et ramifications.....*263*
Rashevsky et Legay.....*266*
La biocybernétique, la systémique et ce qu'en retient Legay : tout est lié - 1967-1971 268
Le groupe « Méthodologie » de la DGRST : une rencontre avec l'écologie.....*273*
Une intervention de la philosophie française : l'accusation d'idéalisme *275*
Informatique et Biosphère et la « Méthode des modèles » *279*
Conséquence de cette épistémologie pour la simulation sur ordinateur.....*283*
La ramification du gui : un modèle pour l'épistémologie des modèles.....*285*
Bilan : la non existence du modèle unique.....*288*
CONCLUSION : MULTIPLICATION ET DISPERSION DES FORMALISMES 290

TROISIEME EPOQUE : LA CONVERGENCE.....292

INTRODUCTION – DE LA DIVERSITE DES CONVERGENCES A L'UNITE D'UNE METHODE ..293
CHAPITRE 16 – SIMULATION PROBABILISTE DE FORMES BIOLOGIQUES RAMIFIEES : DAN COHEN (1967) 295
Une enquête de faisabilité sur ordinateur.....*296*
Des classes d'éléments hiérarchiquement organisés et sensibles à l'environnement....*297*
Les rôles de la programmation modulaire, de la simulation et de la visualisation.....*298*
Le rôle épistémique de la simulation pour la biologie du développement *299*
Importance du couplage du calculateur avec un dispositif de visualisation.....*301*
CHAPITRE 17 - LA SIMULATION D'AUTOMATES BIOLOGIQUES MOLECULAIRES SUR ORDINATEUR : WALTER R. STAHL (1961-1967) 303
De l'« analyse dimensionnelle » à l'« automate moléculaire ».....*304*
*Une influence de la biologie moléculaire sur la modélisation mathématique du vivant*306
Une épistémologie néo-positiviste des modèles : assumer et neutraliser la dispersion (1967).....*311*
Purger les modèles de toute métaphysique.....*312*
CHAPITRE 18 - LA SIMULATION DE LA MORPHOGENESE PAR AUTOMATES FORMELS : ARISTID LINDENMAYER (1968-1974).....316
Un botaniste convaincu par le positivisme logique : la « théorie des cycles de vie » ...*316*
Axiomatique inutilisable et axiomatique utilisée.....*320*
De la théorie logiciste à la théorie des automates en passant par l'exobiologie *322*
Eviter d'avoir recours à l'ordinateur.....*326*

Un « modèle mathématique » pour l'« intercellularité » dans le développement.....*327*
Le « modèle développemental » linéaire et les règles de réécriture *328*
Observation de l'« émergence » d'une « régularité inattendue ».....*331*
La « théorie du contrôle morphogénétique ».....*333*
Ce que l'on gagne à discrétiser.....*334*
Le « modèle développemental » de la ramification.....*336*
Première calibration du modèle sur des algues et premier dessin *336*
CHAPITRE 19 – LA RECEPTION CONTRASTEE DES SYSTEMES DE LINDENMAYER (1970-1975) 340
La controverse avec Brian Carey Goodwin au sujet des formalismes « naturels ».....*340*
Un déplacement de l'horizon des automates vers l'horizon des langages *344*
Convergence entre genèse de phrases et morphogenèse végétale *345*
Ce que la biologie apporte à l'informatique : un nouveau modèle de computation.....*349*
Caractérisation, inférence, complexité.....*350*
De l'analyse statistique à la modélisation algorithmique : Hermann et Jacqueline Lück, un cas français (1975) *353*
L'analyse numérique de la croissance : Ralph O. Erickson et l'ordinateur-calculateur *355*
Le tournant logiciste.....*359*
CHAPITRE 20 - LA SIMULATION GEOMETRIQUE A VOCATION BOTANIQUE : HONDA ET FISHER (1971-1977) 362
Reconnaissance de formes d'arbres et écrans graphiques à l'Université de Kyoto.....*362*
Un modèle de simulation génératif et géométrique validé par l'image *364*
Une simulation de la géométrie des tissus.....*365*
La simulation géométrique reste un argument théorique.....*367*
La rencontre avec les mesures : rapprocher la simulation des détails du réel *367*
Les limites de la morphométrie et de l'approche thermodynamique des arbres *368*
La première simulation géométrique d'un arbre réel : le Terminalia *370*
La plante conçue comme métapopulation.....*372*
Une limite de la simulation géométrique.....*373*
Simuler pour tester un argument théorique *375*
Bilan sur la simulation géométrique.....*376*
CHAPITRE 21 – LA PERIODE DE FORMATION ET LE CONTEXTE INSTITUTIONNEL DE L'IFCC (1966-1971).....378
Des modèles de la génétique au « module » des chromosomes.....*380*
La culture tropicale et la création de l'IFCC dans l'après-guerre.....*384*
Le service « Café-Cacao-Thé ».....*386*
Une « large autonomie locale » *387*
La perspective du marché commun : accroître la compétitivité des produits nationaux *388*
L'orientation de la recherche génétique à l'IFCC : l'amélioration des plantes *389*
CHAPITRE 22 – LA PROBABILITE DE FRUCTIFICATION COMME CARACTERE GENETIQUE (1971-1975).....391
Transférer un peu d'économétrie dans la biométrie : le premier article de 1974.....*391*
Des résultats en demi-teinte.....*393*
De la fonction à la structure *395*
Modéliser, c'est former des hypothèses.....*397*
Construire un caractère non directement observable : une probabilité objective.....*398*
Modéliser pour exhiber des faits biologiques *400*
La réception de la thèse de 1975 : une modélisation étrange mais efficace *401*

Hégémonie et résistance de la biométrie à l'IFCC *403*
CHAPITRE 23 – MODELISATION FRACTIONNEE ET SIMULATION GEOMETRIQUE (1975-1981) 408
Représenter fidèlement plutôt que condenser *409*
Essoufflement de la physiologie et des relations d'allométrie traditionnelles *412*
Visualisation et abstraction *414*
Première modélisation fractionnée : l'approche cinétique du caféier *415*
La modélisation de la formation des rameaux : les hypothèses *416*
Le sous-modèle de la formation des rameaux *419*
Le sous-modèle de la croissance des rameaux et l'organigramme intégrateur *421*
Le rôle de la technique : le HP 9820 et le langage HPL (Hewlett-Packard Language) *424*
« Matérialiser » la représentation pour caractériser la verse du caféier *425*
L'insertion d'un savoir d'ingénieur : la résistance des matériaux *426*
Un programme plus complexe et une programmation plus structurée *429*
Comment publier un programme informatique ? *430*
Résultat : des préconisations précises pour le sélectionneur *432*
La réception des deux premiers modèles de de Reffye à l'IFCC *434*
Deux conditions pour « simuler » *435*
CHAPITRE 24 - PREMIERES SIMULATIONS PROBABILISTES : LES TRAVAUX PARALLELES SUR LE CACAOYER (1976-1981) 436
La sous-pollinisation chronique du cacaoyer *436*
Simuler de manière probabiliste pour interpréter la structure des données de terrain . *437*
Une « vérification expérimentale » … par simulation *439*
Un ouvrage de référence dû à des « simulateurs » en recherche opérationnelle *440*
Contingence des types d'événements aléatoires *444*
Ce que l'on gagne à simuler aléatoirement l'aléatoire *444*
La réception du modèle de simulation aléatoire pour le cacaoyer *446*
De la pollinisation au rendement : simuler pour discriminer les différents facteurs biologiques de la fructification *447*
L'« analyse logique » d'un macro-événement : le nombre de fèves par cabosse *448*
Un formalisme peut en invalider un autre *450*
Une « démonstration » par simulation ? *452*
Analyse logico-mathématique des différents faciès par les sous-modèles *453*
Simulation : l'analyse pour la synthèse *453*
Le sens de la méthode de Monte-Carlo *454*
L'achat du tout nouveau modèle d'HP : un enjeu financier, humain et technique *456*
Bilan sur les premières simulations probabilistes *459*
CHAPITRE 25 – LES APPLICATIONS DES SIMULATIONS FRACTIONNEES (1977 – 1981) 460
La simulation détaillée du trafic des insectes : un problème de « file d'attente » (1980) *461*
Un troisième transfert de méthodes venues de la recherche opérationnelle *462*
Relativité des échelles et rôle de la modélisation *464*
Le « rappel » et l'« application » de la théorie des files d'attente *466*
L'organigramme du programme synthétique de simulation de la pollinisation *468*
Des résultats en demi-teinte *470*
Une « équation mathématique » supplante la simulation : un aboutissement aux yeux des agronomes *470*
L'agronomie et les formules mathématiques fonctionnelles *473*
L'application du modèle du caféier à l'étude de l'influence des engrais (1977-1980) .. *474*
Bilan sur les prolongements des premières modélisations du caféier et du cacaoyer ... *476*

CHAPITRE 26 - LE « MODELE ARCHITECTURAL » EN BOTANIQUE : FRANCIS HALLE ET ROELOF A. A. OLDEMAN (1970-1978) 478
Une motivation nouvelle pour la thèse d'Etat : le réalisme botanique *478*
Naissance du concept d'« architecture végétative » *480*
Naissance du concept de « modèle architectural » *484*
Ce qui a motivé l'emploi du terme « modèle » en botanique *486*
Un modèle non mathématique *488*
CHAPITRE 27 - UNE SIMULATION ARCHITECTURALE, ALEATOIRE ET UNIVERSELLE : LA THESE DE 1979 490
Une vision occidentale limitée *492*
Limite de la modélisation mathématique *494*
Limites de la modélisation théorique logiciste *496*
Contre l'esprit analytique de la biométrie *498*
La plante conçue comme population de méristèmes *502*
Modélisation probabiliste de l'activité de croissance des méristèmes *503*
Mortalité des méristèmes et ramifications avec retard *509*
Validation et vérification : arbre calculable et arbre non calculable *510*
Simulation spatiale et intégrale : le verdict du rendu visuel *512*
Simulation de la phyllotaxie *513*
Vitesse, mémoire et souplesse limitées *513*
Diversité des applications réalisées et envisagées *515*
Réception et suite immédiate du programme de simulation des plantes (1979-1981) ... *516*
CHAPITRE 28 – LA PREMIERE CONVERGENCE : AVEC L'INFORMATIQUE GRAPHIQUE (1981-1985) 520
Du terrain de la simulation à la simulation comme terrain *520*
Le retour en métropole : création et informatisation du CIRAD *521*
La rencontre avec l'informatique graphique : itinéraire d'un informaticien français .. *523*
Optimisation d'algorithme, nombres de Strahler et combinatoire énumérative *525*
Ce que Françon retient de la thèse de de Reffye *534*
CHAPITRE 29 - LE REDEMARRAGE DE LA RECHERCHE EN SIMULATION ARCHITECTURALE (1985-1991) 536
Création de l'AMAP et valorisation du premier logiciel : une simulation en préfixé (1987) *537*
Modèles et structures de données : l'apport des langages *538*
Expression générale du « moteur de croissance » en préfixé *542*
Premières applications : médiatiques *543*
Une valorisation de la recherche pour le moins réussie *544*
Timides applications botaniques et agronomiques *546*
Rigueur formelle et perte de sens *546*
Le deuxième logiciel simule le parallélisme (1991) *547*
La construction ordre par ordre exige une nouvelle structuration des données *548*
La simulation d'événements discrets et le moteur de croissance parallèle *549*
La discrétisation de l'espace *551*
La validation de la simulation dans son ensemble *554*
Applications et limites *556*
Des retombées conceptuelles en botanique *557*
CHAPITRE 30 – LA DEUXIEME CONVERGENCE : AVEC LA MODELISATION MATHEMATIQUE EN FORESTERIE (1990-1998) 559
Les agronomes à l'école de la simulation : l'AIP INRA/CIRAD (1990-1993) *559*
L'appel d'offre officiel *562*

Les raisons scientifiques de la sollicitation de l'INRA *563*
Le rôle de l'AMAP dans les projets retenus *566*
Les hésitations de l'INRA : les arguments en présence *567*
Des traces de réticences dans les actes du Colloque de synthèse *570*
Le rapprochement institutionnel INRA/CIRAD autour d'AMAP (1993-1995) *573*
Formalisation conceptuelle et institutionnelle : le laboratoire associé CIRAD/INRA (1995) *575*
L'épistémologie du « modèle général » à valeur empirique *578*
Une maquette informatique comme support d'expériences virtuelles *580*
CHAPITRE 31 - LA TROISIEME CONVERGENCE : RE-MATHEMATISER (A PARTIR DE 1998) 584
Le premier modèle mixte structure-fonction : « l'efficience de l'eau » (1997-1999) *584*
Evolution de la simulation logiciste : 1984-1994 ..... *587*
Une grammaire sensible à l'environnement : GROGRA –1994 ..... *591*
Simuler la plante individuelle pour voir fonctionner les cultures (1997-2000) *595*
L'association avec l'INRIA en Chine : sous-structures et contrôle optimal (1998-2003) *596*
CONCLUSION : CONVERGENCES AUTOUR DE LA SIMULATION PLURIFORMALISEE 600

CONCLUSION GENERALE 604

BIBLIOGRAPHIE THEMATIQUE 610

BIBLIOGRAPHIE ALPHABETIQUE 655

ANNEXE A : HISTOIRE DE LA MODELISATION, ETAT DES LIEUX 699

ANNEXE B : UNE HISTOIRE DE LA PHILOSOPHIE DES MODELES 754

ANNEXE C : GRAMMAIRES DE CHOMSKY 812

ANNEXE D : CARACTERISTIQUES DE LA « HP 9820 » 819

TABLE DES ENCADRES 821

INDEX DES NOMS 822