



HAL
open science

Le Has(Art) et la néce(Cité) - Une approche (auto-)poïétique des systèmes complexes

Guillaume Hutzler

► **To cite this version:**

Guillaume Hutzler. Le Has(Art) et la néce(Cité) - Une approche (auto-)poïétique des systèmes complexes. Système multi-agents [cs.MA]. Université d'Evry-Val d'Essonne, 2011. tel-00676912

HAL Id: tel-00676912

<https://theses.hal.science/tel-00676912>

Submitted on 6 Mar 2012

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 D'EVRY-VAL D'ESSONNE
LABORATOIRE INFORMATIQUE, BIOLOGIE INTÉGRATIVE ET
SYSTÈMES COMPLEXES, EA 4526

DOSSIER

présenté en première version en vue d'obtenir l'Habilitation à
Diriger des Recherches, spécialité « Informatique »

par

Guillaume Hutzler

LE HAS(ART) ET LA NÉCE(CITÉ) - UNE APPROCHE (AUTO-)POÏÉTIQUE DES SYSTÈMES COMPLEXES

Thèse soutenue le xx/xx/xxxx devant le jury composé de :

M. xxx — (Rapporteur)
M. xxx — (Rapporteur)
M. xxx — (Examineur)
M. xxx — (Examineur)

*À ma plus belle co-production de ces dix dernières années. . .
qui n'est pas d'ordre scientifique. . .
quoi que. . .
elle a quand-même fait grimper mon h-number¹. . .*

1. hutzler-number

REMERCIEMENTS

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	v
LISTE DES FIGURES	vii
INTRODUCTION	1
1 HAS(ART) CRÉATEUR ET SCIENCES DE LA COMPLEXITÉ	5
1.1 VERS DES SYSTÈMES COMPLEXES INTERACTIFS	7
1.2 DES PROJETS DE CRÉATION INSPIRANTS	12
CONCLUSION	19
2 LA SIMULATION À AGENTS, POINT DE VUE APPLICATIF	21
2.1 BACTÉRIOPHAGE LAMBDA ET SWITCHS BIOLOGIQUES	23
2.2 MODÉLISATION DE TUMEURS CANCÉREUSES	27
2.3 MODÉLISATION DE LA CROISSANCE URBAINE	32
DISCUSSION - CONCLUSION	36
3 LA SIMULATION À AGENTS, POINT DE VUE TRANSVERSAL	39
3.1 DIFFÉRENTES APPROCHES DE MODÉLISATION	41
3.2 CALIBRAGE DE MODÈLES À BASE D'AGENTS	48
3.3 CARACTÉRISATION DE STRUCTURES ÉMERGENTES	53
3.4 CONCEPTION DE MODÈLES MULTI-NIVEAUX	59
DISCUSSION - CONCLUSION	67
4 L'INTERACTION HOMME-MACHINE	69
4.1 LE PROJET MACHINE	71
4.2 PROROTYPAGE DE SYSTÈMES RÉACTIFS ET ADAPTATIFS	75
4.3 CONSTRUCTION ET RÉGULATION DE TRAITEMENTS DE DONNÉES	80
4.4 RAISONNEMENT PAR ANALOGIE ET ANTICIPATION DU CONTEXTE	85
4.5 INTERACTION HOMME-ROBOT FONDÉE SUR LES ÉMOTIONS . .	89
DISCUSSION - CONCLUSION	93
BIBLIOGRAPHIE	97
BIBLIOGRAPHIE	97

LISTE DES FIGURES

1.1	Photo d'écran de <i>Quel temps fait-il au CapLan ?</i>	9
1.2	Plate-forme technique du <i>Jardin des Hasards</i>	11
1.3	Capture d'écran du <i>Jardin des Hasards</i>	12
1.4	Modèle à base d'agents du <i>Jardin des Hasards</i>	13
1.5	Évolution des populations d'agents du <i>Jardin des Hasards</i> . .	14
1.6	Captures d'écran de l'œuvre <i>Mutations</i>	15
1.7	Le chant des agents dans l'œuvre <i>Mutations</i>	16
1.8	Capture d'écran de l'œuvre <i>Diversité</i>	16
1.9	<i>La chasse aux papillons</i> (fête de la science 2009)	18
2.1	Biologie du bactériophage lambda	23
2.2	Illustration de la voie lysogénique	26
2.3	Illustration d'un switch spontané	27
2.4	Simulation de la croissance d'une tumeur	29
2.5	Ceinture de PAI-1 autour d'une tumeur	31
2.6	Couplage des niveaux dans SIMPOP3	35
3.1	Typologie des grandes classes de modèles	43
3.2	Configurations spatiales stables du switch biologique	47
3.3	Schéma résumé de la méthode ODA	51
3.4	Comparaison des méthodes de calibrage AG et ODA	52
3.5	Évolution des divisions d'un paramètre du modèle	53
3.6	Suivi des groupes dans une simulation de flocking	58
3.7	Evolution de la « Global Efficiency »	59
3.8	Articulation entre SIMPOP2 et SIMPOP NANO	64
3.9	Modèle de tumeur cellulaire et moléculaire	65
3.10	Modèle de tumeur avec noyau agrégé	66
3.11	Modèle de tumeur avec noyau agrégé	66
4.1	Architecture de <i>J'ai dansé avec MACHINE</i>	77
4.2	Modèle d'agent de traitement par automate temporisé	79
4.3	Approche d'Exploration par Voisinage Contrôlé (EVC)	83
4.4	Modèle de comportement des agents de traitement	84
4.5	Exemple de Matrice Progressive de Raven	88
4.6	Architecture de <i>Visualcat</i>	89
4.7	Architecture du modèle GRACE	92
4.8	Interface d'annotation de séquences musicales	93

INTRODUCTION

La métaphore, c'est-à-dire l'image, est la couleur, de même que l'anti-thèse est le clair obscur.

Lettre de Victor Hugo à Émile Péhant, 11 octobre 1868

DE même que les systèmes complexes, naturels et artificiels, auxquels je me suis intéressé au cours de ces dix dernières années, la démarche scientifique, ainsi que le parcours du scientifique qui la déploie, sont par nature « non-linéaires ». Fort heureusement, tous les systèmes non-linéaires ne sont pas chaotiques, même s'il peuvent parfois en donner l'apparence. . . Tout parcours personnel, par ailleurs, est par définition singulier, et certains le sont sans-doute plus que d'autres. . . L'ambition de ce manuscrit est donc d'essayer de dégager la singularité en même temps que la cohérence de mon parcours de chercheur, en remontant à cette occasion un peu en amont de son origine « officielle ».

Les prémices

Le *Jardin des Hasards*, avant d'être le support de mon projet de recherche pendant ma thèse de doctorat (1997-2000), est en effet un projet de création artistique porté par l'artiste multimédia Bernard Gortais². Ce projet était lui-même le prolongement d'un précédent travail d'art numérique porté par le même artiste, *Quel temps fait-il au CapLan ?*, pour lequel j'ai assuré tout le développement technique au cours d'un stage en deuxième année d'école d'ingénieur (1993). Entre les deux projets, une différence essentielle : alors que j'intervenais en tant que « technicien » sur le premier, j'ai travaillé sur le second en tant que « chercheur » en formation, d'abord au cours de mon stage de DEA puis pendant ma thèse. Il ne s'agissait donc plus de développer un logiciel, mais de développer des concepts, accompagnés d'outils pour les mettre en œuvre. Le propos artistique consistait en l'occurrence à présenter au spectateur une fenêtre virtuelle montrant l'évolution d'un jardin artificiel, se développant sous l'influence de la météorologie (pluie, vent, température, ensoleillement) d'un lieu distant. Le travail de recherche s'est quant à lui orienté dans deux directions complémentaires : la première concernait l'étude des systèmes complexes comme moteurs d'évolution pour des approches *génératives* d'œuvres artistiques, c'est-à-dire des œuvres sans fin évoluant perpétuellement sous l'action

2. <http://www.lejardindeshasards.com/>

de règles de génération ; la seconde consistait à voir le projet artistique comme une métaphore des interfaces devant permettre la visualisation en temps-réel de flux de données plus ou moins complexes. En offrant une vue synthétique de données évoluant au cours du temps, ces *Jardins de Données* doivent par exemple fournir à un opérateur des outils visuels de contrôle d'un système, de manière à en faciliter la commande. Dans ce contexte, l'art n'est pas qu'un simple prétexte esthétisant mais il permet d'aborder le problème de la visualisation sous un angle différent et avec un regard nouveau.

La maturité

J'ai depuis lors été nommé comme maître de conférences à l'Université d'Evry-Val d'Essonne (2000), où j'ai pu disposer d'une grande liberté pour poursuivre les recherches qui me tenaient à cœur. En collaboration avec B. Gortais, j'ai ainsi continué à travailler sur différents projets de nature artistique, tout en développant parallèlement ma recherche en informatique, dans le même esprit que pour le *Jardin des Hasards* : d'une part réfléchir à la manière dont les sciences de la complexité peuvent être mises à profit pour produire des créations « intéressantes » d'un point de vue artistique ; d'autre part considérer chaque création comme la mise en scène métaphorique de situations de la vie réelle, constituant ainsi potentiellement un champ d'application nouveau, ou l'opportunité d'aborder un champ d'application déjà défriché avec une approche un peu « décalée ». Progressivement cependant, la recherche en informatique s'est autonomisée par rapport à des projets de création particuliers, les rythmes propres à la recherche et à la création n'étant pas toujours compatibles. C'est ainsi qu'a émergé le projet MACHINE³, en collaboration toujours avec B. Gortais, mais indépendamment d'une création spécifiquement identifiée, dont l'objet était de travailler à la notion d'interaction homme-machine dans le contexte émergent de *l'informatique ambiante*.

Le switch épigénétique

Parmi les thématiques de recherche présentes en germe dans le *Jardin des Hasards*, on pouvait reconnaître *l'interaction homme-machine* naturellement, mais aussi la *simulation à base d'agents*. Ce jardin virtuel peut en effet être pensé comme la simulation d'un écosystème réel, dans laquelle des végétaux et animaux sont modélisés par des agents qui « vivent » et interagissent dans un environnement commun, et qui sont représentés visuellement par une forme colorée. Même si l'objet n'était pas alors de viser au réalisme le plus fidèle dans la reproduction d'un écosystème végétal et animal, la démarche et les outils portent la marque de mon intérêt profond pour la modélisation et la simulation à base d'agents. Cet intérêt remonte lui-même à un projet de DEA consacré à l'étude des mécanismes

3. Multimodal and Adaptive Computer-Human Interaction in Networked Environments

de structuration hiérarchique des sociétés de fourmis de l'espèce *Dinoponera*⁴, dans le cadre de la plate-forme *MANTA* (Drogoul 1993).

Le contexte lié à la localisation géographique et aux orientations scientifiques du laboratoire (LaMI⁵ puis IBISC⁶ à partir de janvier 2006) m'a naturellement conduit à privilégier les applications en biologie, mais sans exclusive, puisque j'ai également co-encadré un travail de modélisation en géographie urbaine. Au-delà de leur intérêt spécifique pour la compréhension d'un domaine d'étude particulier, qu'il s'agisse du cancer ou de la croissance des villes, les différents cas d'études abordés l'ont été en premier lieu du point de vue des apports potentiels aux concepts et aux outils de simulation. Même si la biologie moléculaire et la géographie urbaines n'ont pas forcément les mêmes attentes en la matière, j'ai pu remarquer qu'un grand nombre de problématiques ne sont pas spécifiques de tel ou tel champ d'application mais sont largement partagées à travers les disciplines. Je me suis ainsi attaché à étudier les problématiques de simulation de manière aussi transversale et générique que possible, avant de chercher à développer des modèles dans un domaine spécifique.

Vers la Grande Unification...

Un certain nombre des problématiques abordés dans ce cadre ne sont d'ailleurs pas propres à la simulation mais sont indissociables des systèmes multi-agents ou des systèmes complexes. Un écosystème ou un système social sont en effet des systèmes complexes « naturels » dont une simulation à base d'agents constitue la contrepartie computationnelle sous la forme d'un système multi-agent. Ainsi le calibrage d'une *simulation à base d'agents* n'est-il a priori pas très différent du calibrage d'un *système multi-agent*, de même que la détection de l'occurrence de phénomènes émergents et leur caractérisation dans l'un ou l'autre de ces types de systèmes. Un certain nombre des recherches menées dans le cadre de la simulation peuvent ainsi trouver à s'appliquer dans le cadre des interfaces homme-machine. De manière symétrique, il me semble que la simulation à base d'agents manque d'outils interactifs pour définir des modèles, les observer et les analyser. Ainsi, alors que les problématiques d'interfaces homme-machine d'une part, de simulation à base d'agents d'autre part avaient acquis leur autonomie après le *Jardin des Hasards*, de nouvelles fertilisations croisées vont maintenant pouvoir émerger.

Plan du manuscrit

Je reviendrai dans le **premier chapitre** sur le fil rouge constitué par les différents projets de création artistique développés conjointement avec B. Gortais en explicitant de quelle manière ils ont influencé et orienté ma recherche dans telle ou telle direction. Outre le *Jardin des Hasards*, je présenterai ainsi les projets *Mutations* et *Diversité*.

4. Au sein de cette espèce, tous les individus ont physiologiquement les mêmes potentialités à la naissance. Une hiérarchie s'établit alors entre les individus d'une même colonie, aboutissant à la fécondation de l'individu dominant et de lui seul.

5. Laboratoire de Méthodes Informatiques, UMR 8042

6. Informatique, Biologie Intégrative et Systèmes Complexes, EA 4526

J'aborderai ensuite, dans les deux chapitres suivants, les travaux développés autour des problématiques de modélisation et de simulation à base d'agents, d'abord d'un point de vue appliqué, puis d'un point de vue transversal. Dans le **deuxième chapitre**, je présenterai ainsi la simulation d'un switch biologique, de tumeurs cancéreuses et de la croissance de villes. Dans le **troisième chapitre**, je positionnerai l'approche à base d'agents par rapport à un ensemble d'autres approches, utilisées notamment dans le domaine de la biologie moléculaire. Je développerai ensuite les travaux relatifs au calibrage de modèles, à la caractérisation de phénomènes émergents et à la modélisation multi-niveaux.

Le **quatrième chapitre** enfin sera consacré aux travaux développés autour de la thématique de l'interaction homme-machine, dans le cadre plus particulièrement de l'intelligence ambiante et du projet MACHINE.

HAS(ART) CRÉATEUR ET SCIENCES DE LA COMPLEXITÉ



SOMMAIRE

1.1	VERS DES SYSTÈMES COMPLEXES INTERACTIFS	7
1.2	DES PROJETS DE CRÉATION INSPIRANTS	12
	CONCLUSION	19

AINSI que je l'ai souligné dans l'introduction générale, la création artistique a joué un rôle important pour influencer les directions de recherche que j'ai choisies depuis le début de mon parcours de chercheur. Il est donc utile, pour comprendre ce parcours, de s'arrêter un instant sur ces projets artistiques successifs en explicitant les problématiques de recherche qu'ils ont suscitées. Au préalable, je souhaite poser le cadre plus large de création dans lequel ils ont été élaborés, en lien avec les systèmes complexes.

1.1 VERS DES SYSTÈMES COMPLEXES INTERACTIFS

Le has(art) et la nécessité

Jacques Monod avait l'habitude de dire que le titre de son ouvrage (Monod 1970) lui avait été inspiré par Démocrite, affirmant que « Tout ce qui existe dans l'univers est le fruit du hasard et de la nécessité ». Même si l'origine de la citation est douteuse, elle souligne dans son esprit le dialogue permanent entre le hasard à l'œuvre au niveau micromoléculaire dans la construction de l'ADN, et la nécessité introduite par le processus ontogénétique qui transforme l'ADN en individu mature selon un ordre invariant. Toute la diversité des formes du vivant serait ainsi contenue en puissance dans ce hasard créateur, réfutant ainsi l'idée de téléonomie devant aboutir nécessairement à l'apparition de l'homme. Comme l'explique Monod, « Le hasard seul est à la source de toute nouveauté, de toute création dans la biosphère. Le hasard pur, le seul hasard, liberté absolue mais aveugle, à la racine même du prodigieux édifice de l'évolution ».

Le hasard, source de « création », au sens de nouveauté, peut-il pour autant être source de créativité? A. Gide, cité par A. Camus lors de son discours de Suède (Camus 1958), affirme pour sa part que « L'art naît de contraintes, vit de luttés et meurt de liberté ». La création naturelle ne serait-elle que hasard? La création artistique ne serait-elle que contrainte? Si les points de vue semblent radicalement opposés, nous ne les voyons pourtant pas comme contradictoires. Dans la nature en effet, la liberté créatrice est une liberté contrainte. Car si la nouveauté est bien le fruit d'un hasard absolu, cette nouveauté n'est conservée que si elle passe avec succès le filtre de la sélection naturelle (Darwin 2008). Autrement dit, si la nouveauté produite par hasard, accidentellement, se révèle adaptée au milieu naturel. La création naturelle n'est donc pas le fait du seul hasard, mais bien le résultat combiné du hasard et de la sélection, donc de la contrainte. De manière symétrique, la création artistique ne saurait vivre dans la seule contrainte. Commentant la citation de Gide, Camus affirme que « L'art ne vit que des contraintes qu'il s'impose à lui-même : il meurt des autres. En revanche, s'il ne se contraint pas lui-même, le voilà qui délire et s'asservit à des ombres. » Un système de création trop contraint est figé et ne peut pas évoluer. A l'inverse, d'un système qui n'en aurait aucune ne pourrait rien émerger d'intéressant sur le plan artistique, sauf à considérer que « tout est art ». Et comme le rappelle (Martin 1978), « L'idée que tout est art est en soi une idée assez peu importante. Ce qui est important, si vous croyez à cette idée, c'est l'usage que vous en faites ».

Il nous apparaît pour notre part que, de même que les systèmes complexes exhibent des comportements auto-organisés et émergents à la frontière du chaos, entre le cristal et la fumée (Atlan 1979), de même la création artistique s'épanouit-elle dans un juste milieu entre contraintes et liberté. « Les contraintes ne sont ni des obstacles ni des barrières ou des entraves. Pour les sous-systèmes téléonomiques qu'elles contraignent – les organismes dans la nature, les personnes dans la société– elles sont les principes de créativité, les règles dont l'application rendent possible la complexité de l'organisation » (Wilden 1983). « La contrainte s'impose donc comme cadre conceptuel déterminant le champ des possibles de la

création, et l'artiste, informé de ce cadre, disposera des repères qui lui permettront de se positionner artistiquement, et pourquoi pas de décider des contraintes sur lesquelles il veut s'appuyer ou dont il désire s'affranchir pour créer » (Eudier 2006).

Contraintes et liberté, règles et stochasticité, nécessité et has(art)... tels sont les points d'ancrage essentiels dans le dialogue permanent entre l'artiste multimédia et le chercheur en informatique, entre Bernard Gortais et moi-même depuis plus de quinze ans (voir aussi (Sauvageot et al. 2001)).

Quel temps fait-il au CapLan ?

Toute la réflexion développée ici, ainsi que les créations développées au cours des quinze dernières années tirent leur origine de la création originelle *Quel temps fait-il au CapLan ?*, produite par la galerie Natkin-Berta en 1993. Cette œuvre porte en effet en germe le principe d'*œuvre générative infinie et située*. Et de par les limitations techniques qui la caractérisent, elle porte également en elle la frustration qui a conduit par la suite à développer le principe d'*œuvre générative infinie et située complexe*.

Ce projet est la conséquence d'un long séjour à Montréal durant lequel B. Gortais a programmé en Logo (Resnick 1988) des pavages de l'espace à deux dimensions. Cette démarche, influencée par l'œuvre de P. Stevens (Stevens 1978) lui a permis de générer automatiquement des images numériques. Par-delà la fascination de la machine, la médiocrité du résultat esthétique, la redondance, l'absence de rythme l'ont incité à essayer d'aller plus loin dans les projets suivants.

Le projet artistique Dans *Quel temps fait-il au CapLan ?*, l'objectif est de faire évoluer une image abstraite en interfaçant le graphisme avec un ensemble de variables météorologiques, astronomiques et maritimes, de manière à suggérer, en temps-réel, l'ambiance météorologique d'un endroit particulier (le CapLan est un café-livre situé sur la côte nord de la Bretagne, entre Lannion et Morlaix).

L'animation de l'image consiste à reproduire une peinture abstraite en la décomposant en un certain nombre d'éléments graphiques indépendants les uns des autres. Chaque objet est ensuite interfacé avec certaines des variables choisies, de manière à en changer en continu la position, la couleur, la forme, en fonction du temps (au sens météorologique, mais également au sens chronologique). Certaines animations exceptionnelles peuvent de plus être envisagées ponctuellement, au moment du lever du soleil par exemple, ou pour suggérer la présence de vent (voir figure 1.1).

Contraintes de création On peut qualifier ce type de création d'*œuvre générative infinie et située*. Œuvre *générative* car la production des images ou animations numériques est le résultat d'un calcul réalisé par un programme informatique. Chaque image est donc construite, générée, à partir d'éléments picturaux primitifs dont on peut modifier certaines caractéristiques (couleur, taille, etc.), et que l'on peut agencer et juxtaposer de manière différente en fonction de l'effet recherché. Œuvre *infinie* car elle est conçue pour fonctionner de manière continue et permanente, jour et nuit,

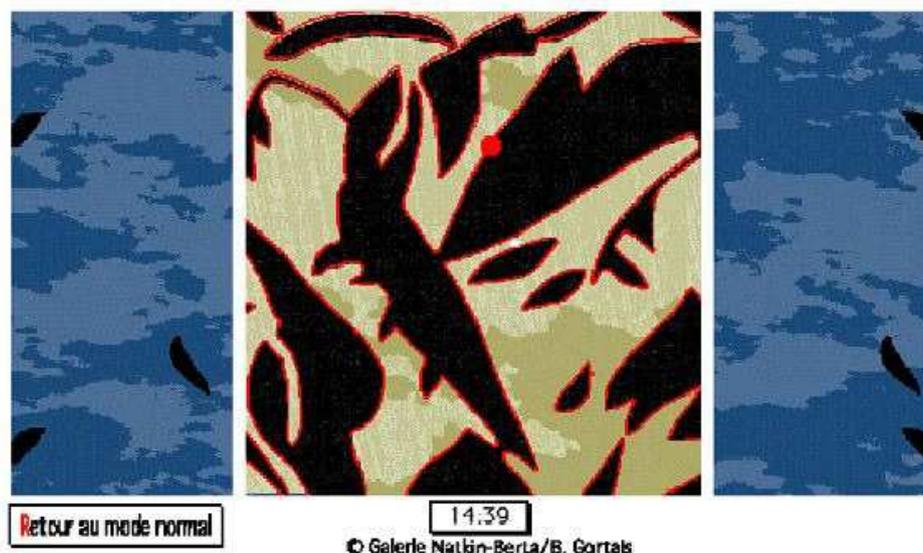


FIGURE 1.1 – Photo d'écran de « Quel temps fait-il au CapLan ? »

et tout au long de l'année. Œuvre *située* enfin car l'évolution de l'animation est guidée par la réception, par le système, d'un certain nombre de données en provenance du monde réel. L'œuvre est donc en prise directe avec le monde extérieur. Ce faisant, l'image fonctionne comme une fenêtre virtuelle à travers laquelle le spectateur peut accéder à une réalité distante, en en retirant une compréhension intuitive du temps qu'il y fait.

Démarche plastique et filiation artistique Du point de vue artistique, le travail a consisté à rechercher les moyens plastiques d'exprimer des ambiances visuelles. Comment composer des éléments plastiques élémentaires de manière à construire une ambiance visuelle qui soit évocatrice de cette réalité distante, en l'occurrence la météorologie du lieu dont on a récupéré les données ? Autrement dit, comment faire ressentir à la personne qui regarde l'œuvre, des sentiments et des émotions similaires à ceux qu'il aurait ressentis dans des conditions météorologiques similaires. « Un tableau ne vit que par celui qui le regarde » disait Picasso. Du point de vue de l'objectif, nous nous situons ainsi dans la lignée de l'impressionnisme qui vise à transmettre des impressions, une atmosphère lumineuse, mais aussi du cubisme ou du futurisme (Malevitch 1994).

Cependant, il ne s'agit plus de reproduire l'aspect d'objets réels, mais d'arranger les unes par rapport aux autres des formes et des couleurs de manière à susciter certaines émotions pour celui qui les regarde. Là encore, plusieurs mouvements se sont développés qui incarnent cette démarche : le suprématisme (Malevitch 1994), le cubisme « synthétique », le constructivisme (Souriau 1990), l'expressionnisme. « La couleur est la touche, l'œil est le marteau. L'âme est le piano aux cordes nombreuses. L'artiste est la main qui, par l'usage convenable de telle ou telle touche, met l'âme humaine en vibration » (Kandinsky 1989), ce que W. Kandinsky appelle le principe de la nécessité intérieure, et qu'il étend à l'utilisation de la forme. Les recherches picturales de Kandinsky seront ainsi motivées par l'élaboration du « mode d'emploi » de ce piano artistique. Au

début du XX^{ème} siècle, la recherche artistique s'est ainsi orientée vers une conception « systémique » de l'art qui consiste, pour rendre perceptibles des sentiments ou une certaine réalité abstraite, à manipuler des systèmes de formes, de couleurs, de matériaux, etc. pour « construire » des œuvres.

L'œuvre comme système complexe

L'image comme système La peinture, et l'image d'une manière plus générale, peuvent être considérées comme des systèmes, dans le sens où une œuvre constitue un tout composé d'un ensemble d'entités (des formes et des couleurs) autonomes en interaction dynamique. La peinture pourtant, au sens traditionnel du terme, est un art figé, c'est à dire que l'œuvre elle-même est immobile. Mais une œuvre devient « vivante », et ses éléments constitutifs commencent à interagir les uns avec les autres, dès lors qu'elle est regardée par le peintre ou par un spectateur. Non pas que les formes et les couleurs se déplacent sur la toile au sens propre, mais le processus perceptif par lequel l'œuvre est perçue met en relation de manière dynamique les éléments visuels élémentaires qui composent l'image. Il suffit par exemple de placer deux points noirs sur une feuille blanche pour qu'aussitôt notre esprit construise une ligne entre les deux (Hutzler et al. 1998).

L'art intermédiaire Il apparaît assez nettement une convergence, à la fois d'intérêt et de démarche, entre ces pratiques artistiques nées au début du XX^{ème} siècle et qui se sont propagées jusqu'à nos jours sous différentes formes, et la pratique scientifique structuraliste apparue à la même époque et que prolongent aujourd'hui l'approche systémique et les sciences de la complexité. « Nous assistons à la fin d'un monde. L'art demain ne produira plus des « œuvres », mais quelque chose pour lequel nous manquons d'un nom. On créera non plus des objets mais des sortes de micro-univers, en perpétuelle évolution. Ces univers seront des tissus de changements ininterrompus, des réseaux mobiles de lignes, de surfaces, de formes, de forces en constante interaction. L'art des métamorphoses de l'univers fera bientôt son apparition dans le monde des métamorphoses de l'art » (Quéau 1989). On observe donc un glissement depuis un art qui s'intéresse à la composition d'images vers un art qui s'intéresse à des processus susceptibles de composer des images. L'œuvre est alors considérée comme un système complexe de formes plastiques, c'est-à-dire un système dans lequel des éléments de composition interagissent de manière dynamique les uns avec les autres, selon une structure et une organisation qui évoluent elles-mêmes de manière dynamique.

Les systèmes multi-agents Par les possibilités qu'ils offrent pour créer, manipuler, simuler toutes sortes de systèmes complexes, naturels et sociaux, les systèmes multi-agents constituent un outil puissant et souple pour faire le lien entre art et science, à la fois outil de simulation scientifique et outil de création artistique. Si l'on accepte en effet l'idée que la perception des images passe par la mise en relation, chez le spectateur, des éléments qui composent l'image, il semble assez naturel de s'intéresser au paradigme informatique qui se fonde sur ces mêmes notions d'interaction

localisées entre un ensemble d'entités pour construire les images en question. Rien n'empêche dès lors d'envisager de riches interactions entre les deux domaines : la simulation scientifique peut servir de base à la création artistique, ce qui fonde l'art intermédiaire décrit par P. Quéau ; l'art peut en retour contribuer à l'intelligibilité de simulations scientifiques.

Vers des systèmes interactifs Si dans l'esprit, *Quel temps fait-il au Caplan ?* est construit comme un ensemble de formes colorées en interaction, en pratique, ces formes colorées n'ont pas encore acquis d'autonomie au sens des agents : un processus centralisé choisit des formes, modifie leur taille et leur couleur, les positionne à l'écran. Les possibilités d'interaction entre formes sont donc limitées, de même que les possibilités d'interaction entre l'œuvre et le spectateur. C'est pour dépasser ces limitations qu'a été imaginé le projet de création *Jardin des Hasards* ainsi que tous ceux qui en découlent directement, parmi lesquels *Mutations* et *Diversité*. Chacune de ces œuvres peut ainsi être vue comme un système complexe d'éléments de composition visuelle et sonore, en interaction les uns avec les autres, et également en interaction avec le milieu environnant, qu'il s'agisse du spectateur ou d'autres systèmes complexes (voir figure 1.2). Chacune peut également être vue à la fois comme terrain d'expérimentation artistique, et comme support de travaux de recherche en informatique sur l'interaction multimodale. Dans ce cadre, les différents projets d'installations artistiques sont vus comme des métaphores des scénarii interactifs pour lesquels on souhaite développer des solutions informatiques pertinentes.

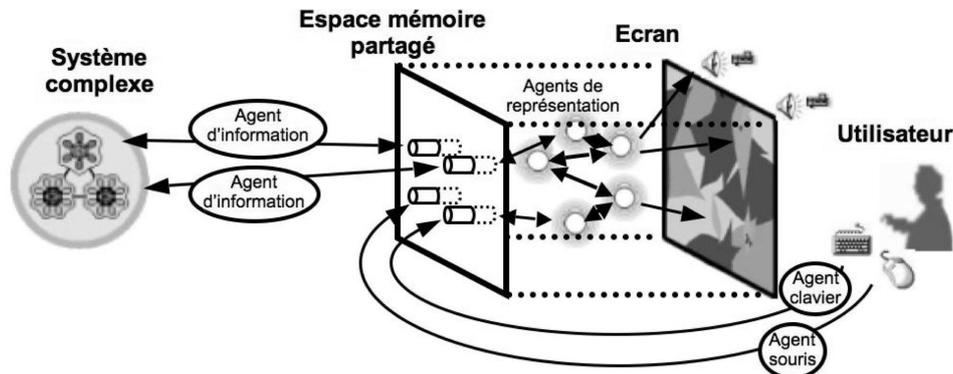


FIGURE 1.2 – Schéma général de la plate-forme technique du « Jardin des Hasards »

Des œuvres autopoïétiques Si l'on accepte de doter les éléments picturaux d'autonomie, le processus de création artistique ne consiste plus à composer des images en agençant un ensemble d'éléments picturaux les uns par rapport aux autres. Il s'agit maintenant d'imaginer les comportements individuels de ces éléments picturaux de manière à ce que, placés ensemble en interaction dans un espace commun, ils mettent en œuvre une dynamique d'organisation qui structure l'œuvre de manière intéressante, aussi bien du point de vue spatial que temporel. Et puisqu'il s'agit d'œuvres infinies, il est nécessaire à la fois qu'elles se régénèrent sans cesse de manière à introduire de la nouveauté, et qu'en même temps elles restent structurellement stables. Le tout en interaction avec le monde extérieur, qu'il s'agisse de données météorologiques ou d'actions du spec-

tateur. L'œuvre devient ainsi un système autopoïétique, c'est-à-dire qu'il doit être « organisé comme un réseau de processus de production de composants qui (a) régénèrent continuellement par leurs transformations et leurs interactions le réseau qui les a produits, et qui (b) constituent le système en tant qu'unité concrète dans l'espace où il existe, en spécifiant le domaine topologique où il se réalise comme réseau. Il s'ensuit qu'une machine autopoïétique engendre et spécifie continuellement sa propre organisation. » (Maturana et Varela 1994). L'œuvre doit pour cela faire preuve d'*homéostasie*, c'est-à-dire avoir la capacité, de par ses mécanismes auto-régulateurs *internes*, de conserver son équilibre de fonctionnement en dépit des contraintes qui lui sont extérieures. Autrement dit, les mécanismes génératifs mis en œuvre, les interactions entre éléments plastiques, doivent assurer que l'œuvre reste toujours intéressante à regarder en dépit des perturbations qu'elle subit. L'œuvre doit être, de manière stable, animée d'une sorte de « respiration » ou de « vibration » qui la fait évoluer continuellement.



FIGURE 1.3 – Capture d'écran du « Jardin des Hasards »

1.2 DES PROJETS DE CRÉATION INSPIRANTS

Le Jardin des Hasards

Un écosystème visuel Dans ce projet qui reprend le principe de représentation visuelle et sonore d'une ambiance météorologique, l'image est cette fois explicitement imaginée comme la métaphore d'un jardin, composé d'un ensemble de formes colorées en interaction (voir figure 1.3). Ces formes sont construites d'après la métaphore d'organismes végétaux se développant en relation avec la météorologie du lieu distant, mais également en compétition les unes avec les autres, se reproduisant et mourant de même que tout être vivant. De cette manière, le propos n'est pas, bien sûr, d'obtenir une reproduction exacte du monde réel, mais plutôt une représentation métaphorique d'un monde propre à l'artiste, fondée sur l'utilisation de données météorologiques et de processus empruntés au

monde végétal et au monde animal. L'important est d'ouvrir sur la possibilité de création, par l'artiste, d'un grand nombre de mondes différents, s'inspirant en cela des démarches organicistes et construites des premiers peintres abstraits, W. Kandinsky et P. Klee en particulier (Kandinsky 1989; 1991, Klee 1985).

Dans une démarche créatrice, le Jardin des Hasards (Hutzler et al. 2000) a été imaginé comme un écosystème de création artistique, permettant de proposer au spectateur une vision poétique des évolutions météorologiques. Dans une démarche pédagogique, il a été conçu comme un outil didactique, rendant explicite la dynamique évolutive d'un écosystème végétal et animal.

Has(art) et nécessité L'homéostasie est obtenue dans ce projet sous la forme d'un système de type proie-prédateur (Volterra 1931) auquel s'ajoute l'environnement végétal d'un jardin virtuel (voir figure 1.4). Ce dernier est constitué d'un ensemble de formes colorées qui, telles des plantes, se développent plus ou moins bien suivant que les conditions météorologiques sont plus ou moins favorables. Et puisque l'espace est limité, celui du jardin comme celui d'une image, ces formes doivent se partager la ressource (matières minérales, lumière, eau). Si elles sont trop nombreuses, elles se gênent mutuellement, ce qui ralentit leur croissance, voire fait mourir certaines. A l'inverse, si elles sont peu nombreuses, chacune a accès à davantage de ressources ce qui favorise leur croissance et permet leur reproduction. On a donc une boucle de rétroaction négative qui conduit à une auto-régulation du jardin virtuel. A cette dynamique s'ajoute celle d'une chaîne trophique simplifiée dont l'écosystème végétal constitue le premier maillon. A un premier niveau, des animaux herbivores se nourrissent des végétaux du niveau de base. A un deuxième niveau, des animaux carnivores se nourrissent des animaux herbivores du premier niveau. Ce modèle a été implémenté sur la plate-forme *JDH* que j'ai développée au cours de ma thèse et qui représente globalement un total d'environ 30000 lignes de code en C++/OpenGL.

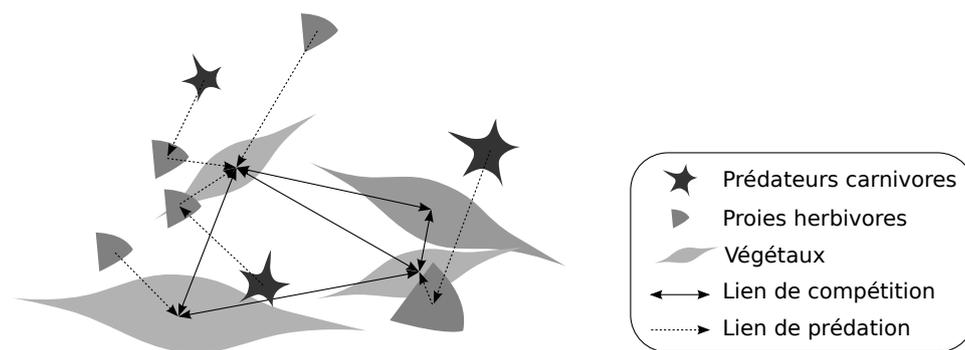


FIGURE 1.4 – Modèle à base d'agents du « Jardin des Hasards »

Le *Jardin des Hasards* n'est un écosystème simulé que d'un point de vue métaphorique. Je n'ai donc jamais prétendu atteindre un réalisme ou une vérité scientifique et il est donc inutile de parler à son sujet de *validation*. Néanmoins, l'évolution des populations des différentes espèces présentes dans la simulation (voir figure 1.5) exhibe une dominance alternée et cy-

clique de chacune des populations du système, caractéristique de celles décrites en écologie des populations concernant les écosystèmes de type proie-prédateur (Volterra 1931).

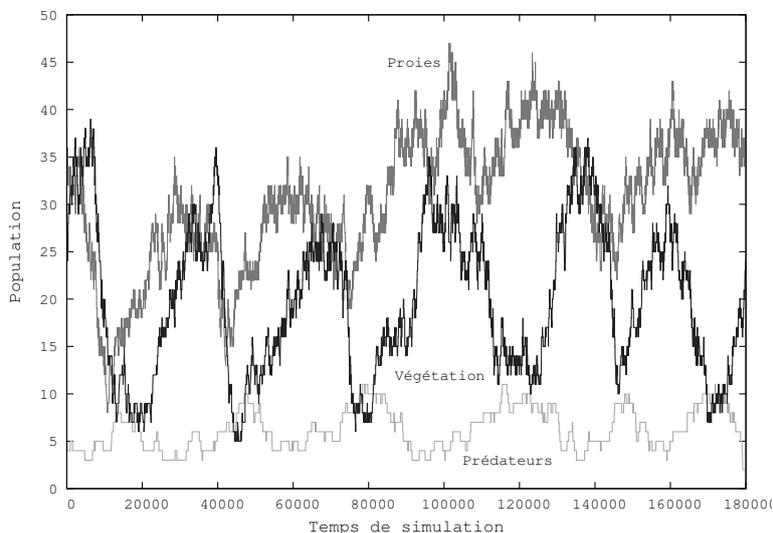


FIGURE 1.5 – Évolution des populations d'agents du « Jardin des Hasards »

Du Jardin des Hasards aux Jardins de Données Indépendamment de sa visée artistique, on peut considérer le *Jardin des Hasards* comme une interface de visualisation de données. C'est ainsi que j'avais proposé, au cours de ma thèse de doctorat, de développer cet aspect de visualisation de flux de données complexes, en tirant parti de la métaphore du jardin, ce que j'avais appelé les *Jardins de données*. De même que dans le *Jardin des Hasards*, l'encombrement spatial limite la croissance des plantes qui s'y développent, de même dans les *Jardins de données*, l'encombrement de l'image, donc la quantité d'information affichée, doivent-ils être régulés de manière à ce que la charge cognitive de l'utilisateur de l'interface reste supportable.

Mutations

Un écosystème sonore Dans cette création en collaboration avec Yann Orlarey du Grame (Hutzler et al. 2001), c'est la dynamique sonore qui a été recherchée en même temps que la dynamique visuelle (voir figure 1.6). L'idée principale était de permettre aux agents composant l'image de « chanter » en fonction de leur « état de forme » individuel, et en fonction de leurs interactions mutuelles. Ce qui est ainsi visé, c'est la mise en place de dialogues musicaux entre formes voisines dans l'image et, plus globalement, d'une composition musicale au niveau du système. A un niveau supérieur, le projet est de mettre en relation quatre systèmes distincts, connectés à quatre sources de données météorologiques qui correspondent à quatre lieux géographiques symbolisant les quatre saisons. (Capetown, Oslo, Shuzhou, Rio de Janeiro). L'objectif est ainsi d'immerger entièrement le spectateur dans une ambiance visuelle et sonore en renouvellement permanent, avec des contrastes forts, aussi bien sur le plan visuel que sonore.

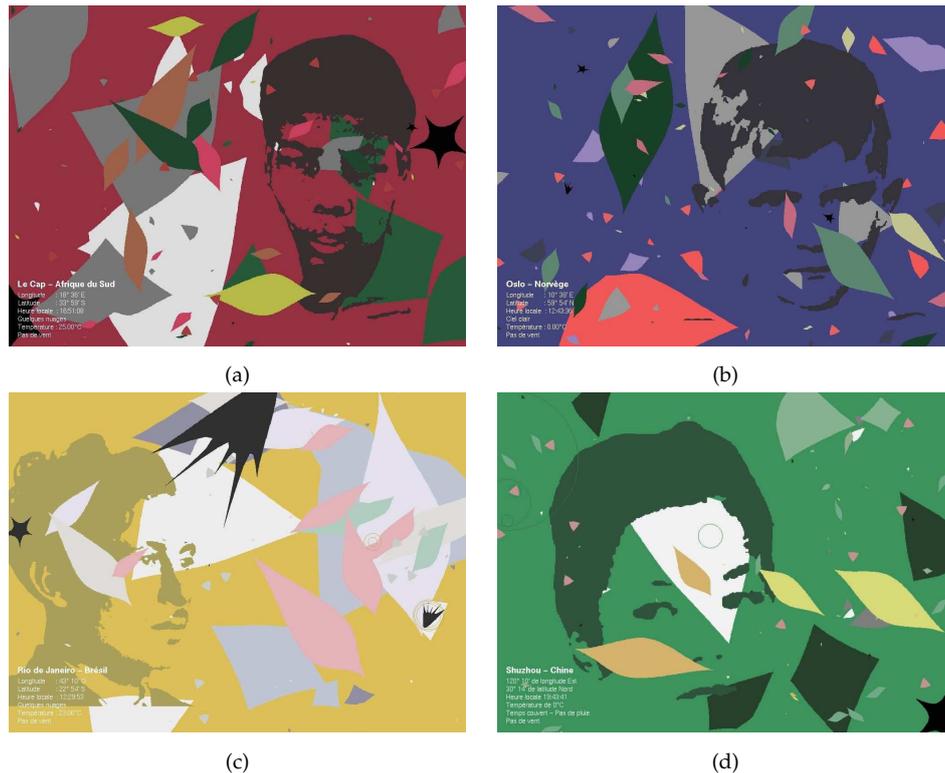


FIGURE 1.6 – Captures d'écran de l'œuvre « Mutations » : (a) Le Cap / Afrique du Sud (b) Oslo / Norvège (c) Rio de Janeiro / Brésil (d) Shuzhou / Chine

Has(art) et nécessité Pour éviter la cacophonie, il est nécessaire d'une part que les « voix » des agents s'harmonisent, d'autre part que tous les agents ne chantent pas simultanément. Le premier aspect a été traité en associant aux agents des fichiers sonores échantillonnés, créés et sélectionnés pour constituer, pour chacun des systèmes, une palette sonore cohérente. Le second aspect est traité en considérant que les agents, au cours de leur évolution dans l'écosystème, acquièrent une quantité plus ou moins grande d'énergie. Ceux dont le seuil d'énergie dépasse un seuil haut S_h peuvent alors spontanément chanter (voir figure 1.7.a), et propagent autour d'eux une onde sonore. Les agents qui perçoivent une onde sonore peuvent à leur tour chanter, pour peu que leur énergie dépasse un seuil bas S_b (voir figure 1.7.b). L'intensité du chant est proportionnelle à l'énergie de l'agent qui le produit. Le chant s'accompagne par ailleurs d'une diminution de l'énergie de manière à éviter que deux agents voisins ne s'auto-activent mutuellement de manière infinie.

Orchestration d'agents situés Du point de vue artistique, le système produit une composition visuelle et sonore qui se renouvelle constamment, tout en conservant en permanence un « style » en adéquation avec les souhaits du compositeur Y. Orlarey. Cet équilibre dynamique délicat est obtenu par la composition des règles décrites ci-dessus et de l'intervention du hasard pour apporter sans cesse de la nouveauté. Par rapport à la régulation de l'encombrement spatial introduite dans le *Jardin des Hasards*, on a donc ici des principes plus dynamiques de transmission d'information,

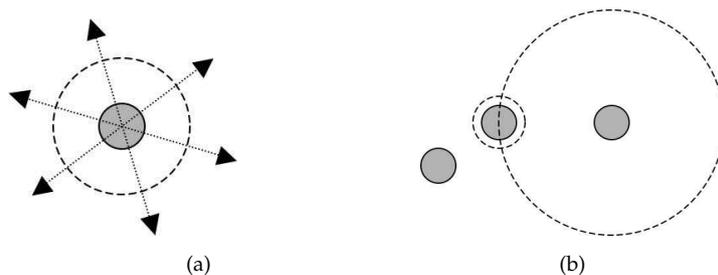


FIGURE 1.7 – (a) un agent qui a suffisamment d'énergie « chante » spontanément et propage une onde sonore autour de lui ; (b) un agent qui perçoit une onde sonore se met à « chanter » en réponse

de synchronisation qui peuvent également être recyclés pour la conception de systèmes de visualisation.

Divercité

Interactions multimodales en environnement ambiant Même si le *Jardin des Hasards* inclut une interactivité avec le spectateur en offrant la possibilité à ce dernier de « cultiver » son jardin (ajouter une plante, en supprimer une, les arroser, leur mettre de l'engrais), cette interactivité restait jusqu'à présent limitée. Avec la création *Divercité* (voir figure 1.8), le spectateur rentre au coeur de la création en prenant un rôle actif. L'objectif est en effet que la dynamique globale du système soit la résultante combinée d'une dynamique endogène au système, et d'une pression exogène exercée par les spectateurs.



FIGURE 1.8 – Capture d'écran de l'œuvre « Divercité »

Du point de vue scientifique, on passe avec cette œuvre d'une problématique de visualisation à une problématique d'interaction homme-machine.

Has(art) et nécessité Dans l'œuvre *Mutations*, le principe de composition musicale décentralisée repose sur un ensemble d'agents situés capables de

chanter et de déclencher le chant chez les autres agents. Pourquoi le spectateur ne pourrait-il pas avoir lui-même cette capacité de chanter et de faire chanter ? Il suffit pour cela qu'il soit situé, dans un espace qui, à défaut d'être commun, doit être « en correspondance ». Autrement dit que la position du spectateur dans son espace soit mise en correspondance avec une position dans l'espace des agents. Nous utilisons pour cela un tapis sensitif de 3 mètres de côté, constitué d'une grille de 64 capteurs (8x8), qui récupère la coordonnée (x, y) du capteur où se trouve le spectateur, et la transmet au logiciel de simulation. En se déplaçant sur le tapis, le spectateur a ainsi la possibilité de perturber le système et d'observer les réorganisations pouvant en découler.

Ces perturbations peuvent avoir pour effet de modifier de manière instantanée l'ambiance musicale en associant un échantillon de son à chaque dalle du tapis sensitif. Elles peuvent également avoir pour effet de produire un chant qui pourra donc lui-même être le déclencheur du chant des formes avoisinantes.

Vers des environnements cognitifs ambiants L'introduction potentielle de multiples modalités de captation provenant d'un ou plusieurs utilisateurs et l'enrichissement des modalités de restitution, amorcé avec le projet *Mutations*, mène à des dispositifs interactifs qui préfigurent, transposés dans le champ artistique, les types nouveaux d'interaction que l'informatique ambiante commence à produire. On peut en effet considérer *Divercité* comme une métaphore des situations d'interaction dans lesquelles des utilisateurs interagissent avec un ensemble de ressources informatiques communicantes enfouies dans leur environnement. Cette création s'inscrit ainsi dans le contexte du projet MACHINE (*Multimodal and Adaptive Computer-Human Interaction in Networked Environments*), qui sera détaillé au chapitre 4, en même temps que les différents développements conduits dans le cadre de l'interaction homme-machine.

Publications

Outre mon mémoire de DEA (Hutzler 1995) qui permet de suivre la genèse de la réflexion sur le projet *Jardin des Hasards*, mon manuscrit de thèse (Hutzler 2000) contient la présentation la plus complète du projet, aussi bien du point de vue artistique que du point de vue de la visualisation de données. (Hutzler et Gortais 2004) présente le lien entre représentation artistique et visualisation scientifique. On pourra également se reporter au travail de Valérie Renault qui en constitue le prolongement direct (Renault et Hutzler 2000, Renault 2001). La problématique de composition dynamique, dans le projet *Mutations*, a été étudiée dans (Hutzler et al. 2001). Enfin, on peut trouver une description des prémices du projet MACHINE dans (Hutzler et al. 2002).

Le lecteur intéressé par les aspects artistiques du *Jardin des Hasards* peut également se reporter à (Hutzler et al. 2000), ainsi qu'au site de Bernard Gortais¹ où tous les projets présentés dans ce chapitre sont détaillés.

1. <http://sites.google.com/site/siatorg/>

Vulgarisation scientifique

La possibilité donnée aux spectateurs d'interagir avec un système de simulation ouvre assez naturellement la voie à des actions de vulgarisation. C'est ainsi que je participe tous les ans à la Fête de la science en adaptant le système de simulation et/ou le scénario d'interaction en fonction des thématiques proposées annuellement. En 2009, dans le cadre du bicentenaire de la naissance de Darwin, j'ai ainsi adapté le modèle `PepperedMoth`² de la plate-forme Netlogo (Wilensky 1999). L'objectif de ce modèle est d'illustrer les mécanismes de sélection naturelle liée à la prédation. Il est inspiré de l'observation faite dans la région de Manchester au XIX^{ème} siècle d'un changement rapide de phénotype de la phalène du bouleau (une espèce de papillon nocturne). Ce changement est généralement attribué aux pollutions liées à la révolution industrielle qui ont noirci les troncs des bouleaux, rendant ainsi les papillons plus visibles, donc plus vulnérables, vis-à-vis de leurs prédateurs, les oiseaux.

En se déplaçant sur le tapis de capteurs, le visiteur joue le rôle du prédateur qui chasse les papillons. A chaque pas, il peut ainsi tuer un papillon, dans la zone de la simulation correspondant à sa position sur le tapis, avec d'autant plus de probabilité que la couleur du papillon contraste fortement avec la couleur du fond de l'écran (voir figure 1.9.b). Chaque fois qu'un papillon est tué, un autre a la possibilité de se reproduire, en transmettant sa couleur à sa descendance. Au cours de cette étape de reproduction, une mutation sur la couleur peut se produire avec une certaine probabilité.

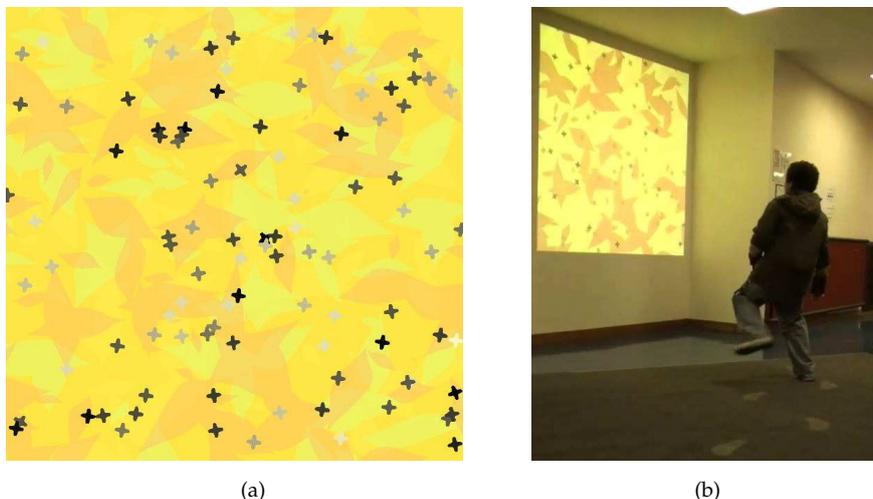


FIGURE 1.9 – (a) photo d'écran de « La chasse aux papillons » (b) photo du dispositif avec un enfant qui interagit avec le système

A fur et à mesure des interactions entre le dispositif et le public, la couleur moyenne de la population évolue très rapidement vers une couleur proche de la couleur du fond. Si la « pression sélective » diminue (i.e. si le public arrête de marcher sur le tapis), la population retrouve rapidement une plus grande diversité de phénotypes. Dans la lignée à la fois de

2. Wilensky, U. (1997). NetLogo Peppered Moths model. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/PepperedMoths>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL.

La chasse aux papillons et du *Jardin des Hasards*, je participerai à nouveau l'année prochaine à la fête de la science avec un dispositif destiné cette fois à illustrer la notion de *bio-diversité*. En agissant à nouveau directement en tant que pression sélective sur un écosystème simulé, le public pourra ainsi toucher du doigt les déséquilibres provoqués par une trop grande pression sur l'une des espèces du système.

CONCLUSION DU CHAPITRE

Jusqu'à présent, les créations proposées ne sont pas encore vraiment illustratives de ce qu'est l'informatique ambiante, ni de ce à quoi ressembleront dans l'avenir les interactions entre humains et systèmes informatiques ambiants. C'est cependant la direction qui est prise, et l'objectif qui est visé, notamment avec le projet MACHINE. Dans sa formulation artistique, baptisée *J'ai dansé avec MACHINE*, le projet vise à établir un dialogue entre un danseur humain et un système informatique distribué capable d'analyser la performance du danseur grâce à différents capteurs et capable d'y répondre grâce à la combinaison de différentes modalités d'expression, visuelle, sonore, haptique, etc.

Ce dialogue doit être vu comme une métaphore des interactions que l'on peut imaginer d'avoir dans un futur proche avec notre environnement domotique ou professionnel. Dans ce contexte se posent un certain nombre de contraintes d'ordre technique : fonctionnement distribué et temps-réel du système informatique, capacités de traitement limitées et possibilités de déconnexion de chacun des objets ou capteurs impliqués. Ces contraintes imposent le développement de systèmes à base d'agents distribués et robustes, qui doivent en outre répondre aux exigences du projet du point de vue de l'ergonomie :

- prise en compte d'utilisateurs très divers : du fait de la pénétration de l'informatique diffuse dans tous les domaines de la vie quotidienne, notamment au sein de la sphère domotique, de plus en plus d'utilisateurs non-experts seront concernés par les problèmes d'interaction avec des sociétés d'agents, ce qui passe par la mise en place de techniques d'apprentissage distribué (Sandholm 2007) ;
- support d'un type de communication multimodal : dans toute communication, les informations véhiculées par le langage humain ne représentent qu'une petite partie de l'information totale, une grande partie passant par les intonations, les gestes et plus généralement le comportement. La communication est par essence multimodale (Coutaz 1996) et la perception à mettre en place de la part du système ainsi que ses possibilités d'expression se devront d'intégrer, de manière distribuée, différentes modalités ;
- mise en scène de l'interaction (méta-interaction) : comme dans toute interaction, on peut se contenter d'être un simple « utilisateur » et apprendre soi-même à exploiter les capacités d'interaction du système, mais l'on peut également souhaiter spécifier la manière dont le système doit se comporter, le mettre en scène en quelque sorte ;
- prise en compte de l'aspect émotionnel de l'interaction : cet aspect joue un rôle primordial dans la communication humaine et il importe que le système d'interaction puisse disposer d'une représenta-

tion des émotions ressenties par son interlocuteur afin de pouvoir y adapter son comportement.

Sous ses dehors artistiques, le projet MACHINE intègre et fédère en réalité un grand nombre de technologies et de problématiques dont le développement connaît actuellement une croissance exponentielle. Il s'agit en particulier des objets communicants, de la réalité virtuelle, des interfaces multimodales, des systèmes *self-** qui constitueront le cœur des concepts de (*pervasive, ubiquitous, amorphous, autonomic*) *computing*. Les systèmes multi-agents ont un rôle à y jouer, mais à la condition de réfléchir conjointement à l'intégration des utilisateurs de ces technologies dans la boucle de conception. Ces problématiques seront développées au chapitre 4, après un détour au cours des deux prochains chapitres par la simulation à base d'agents qui, en plus de constituer le pilier des projets de création présentés dans ce chapitre, s'est rapidement autonomisée en tant que sujet de recherche à part entière.

LA SIMULATION À BASE D'AGENTS, POINT DE VUE APPLICATIF

SOMMAIRE

2.1 BACTÉRIOPHAGE LAMBDA ET SWITCHS BIOLOGIQUES	23
2.2 MODÉLISATION DE TUMEURS CANCÉREUSES	27
2.3 MODÉLISATION DE LA CROISSANCE URBAINE	32
DISCUSSION - CONCLUSION	36

La modélisation et la simulation à base d'agents proposent d'étudier les systèmes complexes de toutes natures en décrivant, à un niveau individuel et local, le comportement et les interactions d'un ensemble d'entités, au sein d'un environnement également modélisé. De toute évidence, les créations artistiques présentées au chapitre précédent répondent à la définition, même si la question posée n'était pas alors de reproduire avec fidélité la dynamique d'un système existant. Ce deuxième chapitre est consacré à la présentation de différents exemples, principalement dans le domaine de la biologie, mais également en géographie urbaine pour lesquels la simulation constitue cette fois-ci la problématique centrale. Même si, chronologiquement, ces exemples applicatifs ont été développés parallèlement, voire postérieurement aux travaux plus transversaux présentés dans le chapitre suivant, je les introduis d'abord de manière à m'appuyer dessus lorsqu'il s'agira de développer un point de vue plus abstrait. Je présente ainsi un modèle de la bascule génétique du bactériophage λ dans la section 2.1, un modèle de croissance de tumeurs cancéreuses dans la section 2.2, et enfin un modèle de croissance de villes dans la section 2.3.

2.1 BACTÉRIOPHAGE LAMBDA ET SWITCHS BIOLOGIQUES

Au cours de la série des écoles de *Modélisation et simulation des systèmes complexes biologiques dans le contexte de la génomique* a été développé un tutorial visant à proposer un éventail comparé d'approches de modélisation et de simulation, en appliquant ces approches au même problème de modélisation (Mestivier et al. 2005). C'est dans un premier temps la *bascule génétique du bactériophage λ* (Ptashne 1992) qui a été choisie avant d'en abstraire, dans un deuxième temps un réseau de régulation génétique simplifié consistant en l'inhibition réciproque de deux gènes.

Question de modélisation

Etant donné le cadre dans lequel ce modèle a été développé, il ne s'agissait pas tant de répondre à une question biologique précise ou de tester des hypothèses, que de montrer, de manière aussi pédagogique que possible, comment l'on pouvait passer d'une description *biologique* d'un système, à une modélisation et une simulation à base d'agents. De manière plus spécifique, le focus était quand même de s'intéresser à la modélisation d'un *switch biologique*, c'est-à-dire d'un sous-système caractérisé par l'existence de deux états stables, et d'un mécanisme permettant de faire basculer le système d'un état stable à l'autre. Le bactériophage λ est des exemples paradigmatiques en biologie de ce type de switchs.

Description du système

Le bactériophage λ est un virus capable d'infecter la bactérie *Escherichia Coli*. Lorsque cela se produit, deux scénarios sont envisageables, connus sous les noms de *voie lytique* et de *voie lysogénique*. Dans la voie lytique, le phage exploite à son avantage la machinerie génétique et chimique de la bactérie pour produire de multiples copies de lui-même, jusqu'à ce que la bactérie finisse par exploser, libérant ainsi les nouveaux virus dans l'environnement, qui pourront à leur tour infecter d'autres bactéries. Dans la voie lysogénique, le phage ne tue pas la bactérie hôte mais se « contente » d'incorporer son propre ADN à celui de la bactérie. Ce faisant, son ADN est répliqué en même temps que celui de la bactérie hôte, ce qui lui assure une capacité de « survie » accrue. Et ce d'autant plus que, occasionnellement, une bactérie « lysogénique » est susceptible de réactiver la voie lytique, permettant ainsi l'infection de nouvelles bactéries jusque là saines.

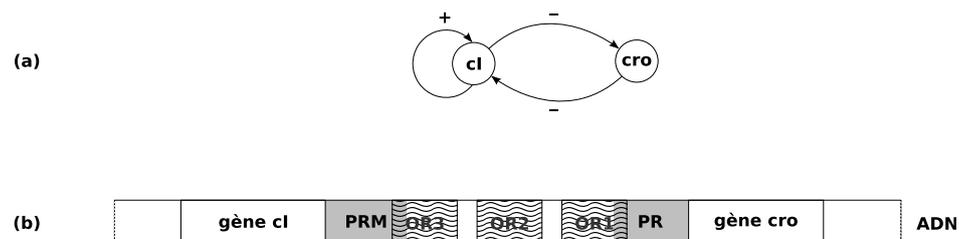


FIGURE 2.1 – (a) Réseau de régulation génétique correspondant à la réaction de la bactérie *Escherichia Coli* en réponse à l'infection par le phage λ ; (b) structure du gène autour de l'opérateur λ et des gènes *cl* et *cro*

Le « choix », pour la bactérie, d'entrer dans une voie plutôt qu'une autre, est sous le contrôle de deux protéines, *CI* connue également sous le nom de *répresseur* λ et *CRO*, produites respectivement par les gènes *cI* et *cro*. Sans entrer trop dans les détails des mécanismes impliqués, il faut noter que ces deux gènes sont en compétition et qu'ils s'inhibent mutuellement. Les protéines *CRO* peuvent en effet venir se fixer, sous forme de dimères CRO_2 , à une position de l'ADN qui recouvre partiellement la zone promotrice du gène *cI* (*PRM*). Celle-ci étant la zone à laquelle l'ARN polymérase vient normalement se fixer pour démarrer la transcription du gène *cI*, la production de la protéine *CI* est alors empêchée. Symétriquement, les protéines CI_2 peuvent se fixer sur la zone promotrice du gène *cro*, *PR*, empêchant alors la production de *CRO*. Ce faisant, cela active dans le même temps la production de *CI* en favorisant la fixation de l'ARN polymérase sur la zone promotrice du gène *cI*. Les différentes interactions régulatrices entre gènes peuvent être abstraites sous la forme d'actions activatrices ou inhibitrices, telles que schématisées sur la figure 2.1.a. Tous ces événements se produisent dans une zone régulatrice très petite de l'ADN, l'opérateur λ , lui-même constitué de trois sites opérateurs OR_1 , OR_2 et OR_3 , auxquels se fixent les dimères CI_2 et CRO_2 selon différentes affinités (voir figure 2.1.b).

Modèle

Dans un souci de prototypage rapide, c'est la plate-forme de simulation *Netlogo* (Wilensky 1999) qui a été choisie pour l'implémentation du modèle.

Décomposition en agents

La simple description du réseau de régulation génique (figure 2.1.a) est insuffisante en elle-même, ou à un niveau d'abstraction trop élevé, pour en fournir une traduction sous forme de modèle à base d'agents. Il est donc nécessaire de descendre à un niveau de description plus fin pour pouvoir décrire les phénomènes sous la forme d'interactions locales entre agents. Le niveau moléculaires semble ainsi plus approprié, avec la difficulté cependant que les molécules impliquées sont de tailles très diverses. La molécule d'ADN est en effet beaucoup plus grande que les protéines *CI* et *CRO*. En outre, les interactions décrites se situent, en ce qui concerne la molécule d'ADN, à un niveau local, c'est-à-dire au niveau des gènes ou des sites de fixation (promoteurs, sites opérateurs). Plutôt que les objets « physiques » en eux-mêmes, ce sont les sites d'interaction qui ont donc été modélisés sous forme d'agents : protéines *CI* et *CRO* et leurs dimères CI_2 et CRO_2 , sites opérateurs OR_1 , OR_2 et OR_3 , promoteurs *PRM* et *PR*, et l'ARN polymérase.

Comportements de déplacement

Les interactions entre molécules sont pour la plupart des réactions chimiques dont l'occurrence est conditionnée par la rencontre entre les espèces impliquées. Le premier aspect relatif à la modélisation du comportement de ce type d'entités concerne donc leur déplacement. Etant donné les ordres de grandeur des vitesses de déplacement des protéines et

de l'ADN, cette dernière a été considérée comme fixe à l'intérieur de la bactérie. Les protéines pour leur part sont libres de diffuser à l'intérieur de la membrane de la bactérie. Cette diffusion a été modélisée en considérant qu'une molécule sélectionne une direction aléatoire à chaque pas de temps¹, et avance d'une distance fixe, ce qui correspond à un mouvement *pseudo-brownien*.

Comportements d'interaction

Les réactions chimiques dans lesquelles sont impliquées les molécules peuvent être classées, du point de vue de la simulation à base d'agents, en deux catégories, en fonction du nombre de molécules impliquées : les réactions *unimoléculaires*, n'impliquant qu'une seule molécule, et les réactions *multimoléculaires*, impliquant deux molécules ou plus. Les réactions unimoléculaires correspondent généralement à des réactions de dégradation dans lesquelles une molécule est modifiée, dégradée, décomposée en nouvelles molécules inactives, sous l'action de molécules qui ne sont pas modélisées en tant que telles. Puisque la molécule devient inactive, tout se passe comme si, du point de vue du modèle, elle disparaissait purement et simplement. Une telle réaction peut ainsi être modélisée comme la probabilité, à chaque pas de temps, que la molécule concernée disparaisse. Les réactions multimoléculaires impliquent pour leur part la rencontre de plusieurs molécules, conduisant à la liaison entre les molécules (réaction de dimérisation par exemple) ou à la transformation de l'une des molécules d'une espèce en une autre (réaction enzymatique par exemple). Pour qu'une telle réaction se produise, il faut non seulement que les molécules concernées se rencontrent, mais également que la rencontre soit efficace, c'est-à-dire qu'elle se produise avec suffisamment d'énergie. Sachant d'une part que la vitesse d'une réaction chimique est proportionnelle au produit des concentrations des espèces en présence et de la constante de réaction, et d'autre part que le produit des concentrations des espèces en présence traduit la probabilité de rencontre des réactifs, on peut assimiler la constante de réaction à la probabilité que la réaction soit efficace lorsque l'évènement de rencontre entre les réactifs se produit. Du point de vue du modèle agent, il suffit alors de considérer, lorsque deux molécules se rencontrent, que la probabilité que la réaction chimique correspondante se produise est proportionnelle à la *constante de vitesse* de la réaction.

Résultats

Etant donnée la quantité de recherches dédiées à l'étude de ce système depuis des dizaines d'années, en biologie et en modélisation, on aurait pu supposer qu'il s'agirait d'un exercice purement formel. J'ai pu montrer cependant qu'il permettait d'apporter un éclairage un peu différent par rapport aux descriptions classiques de la littérature en biologie.

Celles-ci décrivent notamment des scénarios dans lesquels les affinités différentielles des dimères CI_2 et CRO_2 pour les différents sites opérateurs se traduisent sous la forme de situations différentes en fonction des concentrations en CI_2 (ou CRO_2) : à basse concentration, CI_2 se fixerait à

¹. le modèle de gestion du temps de la plate-forme *Netlogo* correspond à un type de simulation à pas de temps discret

OR_1 bloquant ainsi la production de CRO , stoppant l'inhibition de la protéine CRO sur le gène cI et permettant à la concentration de CI_2 d'augmenter ; à concentration moyenne, CI_2 se retrouverait fixé à la fois à OR_1 et OR_2 , activant la synthèse de CI et permettant à la concentration de CI_2 d'augmenter encore plus vite ; à forte concentration, CI_2 se retrouverait fixé à la fois à OR_1 , OR_2 et OR_3 , bloquant la synthèse de CI et conduisant à une concentration d'équilibre en CI et CI_2 . Les simulations effectuées avec le modèle décrit ci-dessus montrent qu'il s'agit en effet du scénario le plus probable, et que, pour chaque niveau de concentration, la situation décrite est également la plus probable (voir sur la figure 2.2 l'évolution dans le temps des concentrations en CI et CRO au cours d'une simulation illustrant la voie lysogénique). En revanche, les simulations démentent une autre description, également classique en biologie mais abusive, qui décrit une chronologie d'évènements où CI_2 se fixe d'abord sur OR_1 puis sur OR_2 et enfin sur OR_3 . Or, rien n'impose que les évènements se produisent effectivement de manière séquentielle et selon cet ordre prédéterminé. Il suffit d'autoriser que les évènements de fixation et de libération de CI_2 et CRO_2 se produisent de manière concurrente avec différentes cinétiques pour reproduire de manière satisfaisante les scénarios proposés, sans avoir à présupposer un ordre dans lequel les réactions devraient se produire.

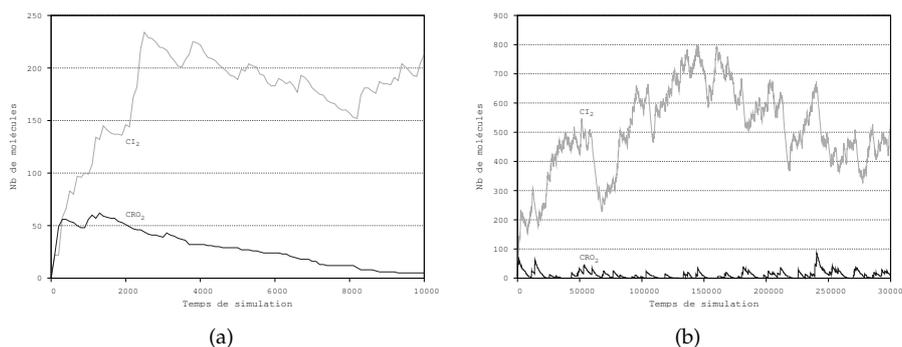


FIGURE 2.2 – Evolution des quantités de dimères CI_2 et Cro_2 en fonction du temps après les 10000 (a) et 300000 (b) premiers pas de simulation, illustrant la voie lysogénique

Cela peut apparaître comme anecdotique et sans importance mais ne l'est pas. C'est en effet ce qui peut permettre de comprendre et d'expliquer finement les mécanismes de fonctionnement du switch : pourquoi et comment, à partir d'une situation initiale où ni CI ni CRO ne sont présents, les deux voies lytiques et lysogénique sont-elles possibles, avec des probabilités différentes ; pourquoi et comment une bactérie lysogénique devient-elle insensible aux nouvelles infections de la part du bactériophage ; pourquoi et comment une bactérie qui a « choisi » la voie lysogénique peut-elle, spontanément, basculer vers la voie lytique ; pourquoi et comment les mutations provoquant ce basculement de manière exogène sont-elles réversibles, mais seulement pendant une certaine période de temps ? Je n'ai pas la place ici de développer les réponses mais elles sont à chaque fois basées sur l'équilibre dynamique et concurrent qui s'établit entre associations et dissociations entre molécules. La figure 2.3 montre que cet équilibre n'est pas figé et qu'avec une certaine probabilité, très faible mais non nulle, l'équilibre peut s'inverser.

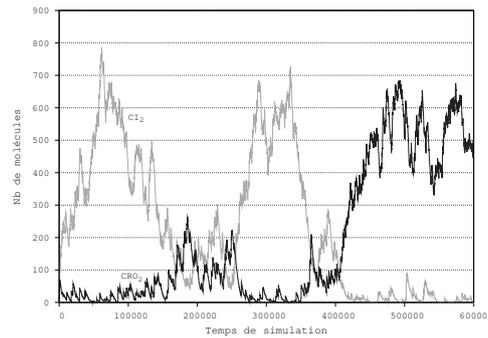


FIGURE 2.3 – Evolution des quantités de dimères Cl_2 et Cro_2 en fonction du temps montrant un switch spontané

Un autre des enseignements de ces tutoriaux, peut-être plus fondamental, est finalement de permettre la comparaison entre les différentes approches de modélisation et de simulation. Comparaison qui met en évidence les atouts et faiblesses de chacun des paradigmes ainsi que les complémentarités potentielles entre eux. En prenant conscience des lacunes de son approche de modélisation favorite, il est ensuite plus aisé de les combler ou d'en limiter les inconvénients. Cette démarche comparative sera développée à l'entame du chapitre suivant.

Publications

On pourra trouver un développement de ces différents résultats dans (Hutzler 2007) pour l'étude du bactériophage lambda, et (Hutzler 2009) pour un modèle plus abstrait de switch biologique. Par ailleurs, ces résultats obtenus ont été jugés suffisamment intéressants pour que le modèle soit repris et donne lieu à publication (Vallurupalli et Purdy 2007).

2.2 MODÉLISATION DE TUMEURS CANCÉREUSES

Le laboratoire IBISC accueille en son sein une équipe de biologistes dits « humides »², c'est-à-dire qu'ils ne sont pas seulement modélisateurs mais également et avant tout expérimentateurs. C'est ainsi que, de manière très naturelle, un intérêt mutuel est né et a conduit à une collaboration suivie autour de la modélisation et de la simulation de la croissance de tumeurs cancéreuses non vasculariées. Sur ce travail de modélisation ont collaboré deux étudiants de master 2, Vincent Le Moal-Joubel du M2 IMBI³(Le Moal-Joubel 2007), et Julien Lepagnot du M2 MOPS⁴(Lepagnot 2008).

Question de modélisation

En matière de cancer, l'un des facteurs de mauvais pronostic est lié à l'apparition de métastases, c'est-à-dire de tumeurs secondaires.

2. l'équipe Dynamic

3. Informatique et Mathématiques pour la Biologie Intégrative

4. Modèles, Optimisation, Programmation, Services

Nous nous sommes intéressés pour notre part aux conditions micro-environnementales, autour d'une tumeur cancéreuse, pouvant conduire à l'échappement métastatique d'une cellule (Lepagnot et Hutzler 2009). En particulier, nous avons étudié le rôle de la molécule PAI-1 (une protéine), suspectée de jouer un rôle essentiel dans la transformation morphologique⁵ des cellules permettant l'échappement (Maquerlot et al. 2006). Dans ce cadre, l'objet de l'étude était d'élucider si les mécanismes connus de production et d'internalisation de PAI-1 par les cellules étaient compatibles, d'une part avec les dépôts observés sous forme de ceinture autour des tumeurs, et d'autre part avec la « rareté » des événements d'échappement métastatique.

Description du système

Une cellule cancéreuse est une cellule qui se met, pour différentes raisons, à proliférer sans contrôle, perdant à l'occasion son adhésivité vis-à-vis des autres cellules. L'amas de cellules proliférantes ainsi produit grossit rapidement, formant une *tumeur*. Les cellules, qui sont alors dans l'état *mésenchymateux*, progressent en dégradant la *matrice extra-cellulaire* par protéolyse⁶. Dans certaines conditions se produit, chez une cellule de la tumeur, une transformation qui la fait passer de l'état *mésenchymateux* à l'état *amiboïde*⁷. Dans cet état, la cellule adopte alors un nouveau mode de migration qui lui permet de se faufiler à travers la matrice extra-cellulaire plutôt que de la dégrader. Une des hypothèses pour expliquer cet échappement se fonde sur la molécule PAI-1, qui jouerait un rôle essentiel tout à la fois dans la transition vers l'état amiboïde, dans l'entretien dans le temps de cet état, mais également dans le mode de migration résultant.

Cette molécule est produite par les cellules elles-mêmes sous forme soluble. Elle diffuse dans le milieu environnant et peut se fixer sous forme *matricielle* à la matrice extra-cellulaire. Dans le même temps, les cellules disposent, sur leur membrane, de récepteurs pour fixer puis internaliser les molécules de PAI-1. Si la molécule est sous forme soluble, celle-ci est simplement recyclée par le système de production de PAI-1. Si elle sous forme matricielle, elle fournit alors aux cellules des points d'adhésion qui leur permettent de migrer à travers la matrice.

Modèle

Le modèle développé intègre, de manière individuelle, aussi bien les cellules cancéreuses que les molécules de PAI-1. La modélisation de la croissance de la tumeur est obtenue par un comportement de division cellulaire : une cellule peut se diviser pour donner deux cellules filles au bout d'un temps variable qui dépend de son accès aux nutriments. Ce comportement prolifératoire est couplé à un comportement de répulsion entre cellules : deux cellules trop proches se repoussent. Le modèle intègre par ailleurs la dynamique de production et d'internalisation de PAI-1 par

5. la transition mésenchymo-amiboïde

6. dégradation des protéines par des enzymes

7. appelée *transition mésenchymo-amiboïde*

les cellules. Pour ce faire, une cellule produit des molécules de PAI-1 avec un certain taux. Dans le même temps, elle peut internaliser le PAI-1 en suspension, ainsi que le PAI-1 matriciel, avec une probabilité directement proportionnelle à son nombre de récepteurs. L'accès aux nutriments définit trois états différenciés pour les cellules de la tumeur : une cellule ayant un accès satisfaisant aux nutriments (couche externe de la tumeur) est *active* et possède à la fois les comportements de prolifération et production/internalisation de PAI-1 ; une cellule ayant un accès insuffisant aux nutriments *nécrose* et meurt (couche interne de la tumeur) ; les cellules de la couche intermédiaire reçoivent quant à elles suffisamment de nutriments pour produire et internaliser PAI-1 mais plus suffisamment pour proliférer ; ces dernières sont qualifiées de *quiescentes*.

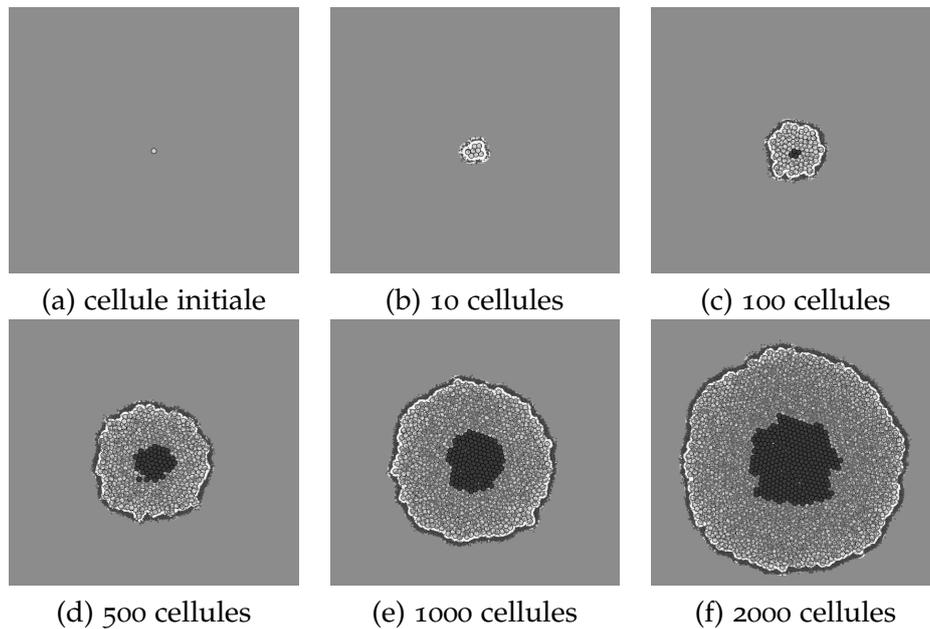


FIGURE 2.4 – croissance simulée d'une tumeur cancéreuse à différentes étapes. Les ronds clairs correspondent aux cellules proliférantes, les ronds plus sombres aux cellules nécrosées ; les points clairs correspondent aux molécules de PAI-1 solubles, les points plus sombres aux molécules de PAI-1 matriciel

La dynamique résultante est celle d'une tumeur en croissance (voir figure 2.4). Lorsque la tumeur simulée atteint quelques milliers de cellules, il faut alors gérer plusieurs centaines de milliers de molécules de PAI-1. On se trouve ainsi rapidement limités par la taille des tumeurs que l'on peut simuler. La solution proposée consiste à abstraire certains détails du modèle dans les zones où ils ne sont pas utiles, ce qui permet au choix de simuler des tumeurs plus grandes ou d'ajouter des détails dans les zones d'intérêt. La zone d'intérêt principal se situant à l'interface entre la couche externe de la tumeur et la matrice extra-cellulaire, nous avons donc proposé de remplacer les couches internes de la tumeur par un modèle agrégé, constitué à la fois de cellules et de molécules de PAI-1. Le coeur de la tumeur et son modèle orienté agents sont ainsi abstraits par un modèle global de calcul de flux entrant et sortant. Du point de vue spatial, ce modèle est délimité par l'ensemble des cellules nécrosées ou quiescentes, à l'exception d'une couche de cellules quiescentes qui constitue la bordure

du modèle agrégé. Ces cellules étant immobiles ou très peu mobiles, cela permet de s'abstraire des mouvements de répulsion entre cellules, ceux-ci étant principalement dus au comportement de division cellulaire dans la couche de cellules actives. Le modèle agrégé intègre toutes les cellules ainsi que toutes les molécules de PAI-1 situées dans le périmètre ainsi défini.

Il s'agit alors de calculer les interactions entre ce modèle agrégé et les cellules ou molécules situées à l'extérieur. Il est relativement aisé de déterminer les cellules et molécules qui devront être intégrées au modèle agrégé : dans le cas des cellules, il s'agit d'examiner lesquelles sont quiescentes et entièrement entourées d'autres cellules quiescentes ; concernant les molécules, il suffit d'examiner lesquelles, dans leur mouvement de diffusion aléatoire, vont percuter la frontière du modèle agrégé. Pour déterminer combien de molécules seront au contraire « relâchées » par ce modèle, il est nécessaire d'évaluer la proportion de cellules nécrosées par rapport aux cellules quiescentes, afin de déterminer le nombre de cellules produisant ou internalisant ces molécules. Il est ensuite aisé de mettre à jour la quantité de molécules de PAI-1 à l'intérieur du modèle agrégé, en considérant que l'activité d'internalisation et d'externalisation de ce modèle agrégé est directement proportionnelle à la quantité de cellules quiescentes qu'il contient. En assimilant les molécules diffusant à l'intérieur du modèle agrégé à un gaz, on peut alors calculer la « pression » à l'intérieur du modèle, et donc déterminer la quantité statistique de molécules de PAI-1 devant quitter le modèle agrégé. Celles-ci sont alors distribuées aléatoirement à l'extérieur du modèle agrégé, au voisinage immédiat de la frontière.

Résultats

Si l'on commence une simulation à partir d'une cellule mésenchymateuse unique, avec une distribution uniforme de vitronectine⁸, et en l'absence de PAI-1 matriciel, la simulation produit un état final dans lequel la cellule initiale a évolué en une tumeur entourée d'une ceinture irrégulière de PAI-1 matriciel (voir figure 2.4 (f)). Cette observation *in-silico* reste vraie pour une large gamme de paramétrages, ce qui atteste de la robustesse du modèle. Cela peut aussi indiquer une robustesse du phénomène lui-même à l'égard de différents changements (conditions environnementales, facteurs métaboliques ou de signalisation, etc.) (Lesne 2008). Les résultats numériques obtenus conduisent à un certain nombre d'observations, qui d'une part corroborent plutôt bien les connaissances biologiques en la matière, d'autre part suggèrent des pistes expérimentales nouvelles :

- *La quantité de PAI-1 matriciel, en un endroit donné autour de la tumeur, varie énormément dans le temps* : cela provient d'une alternance entre des phases durant lesquelles le PAI-1 matriciel s'accumule et des phases pendant lesquelles, du fait de la croissance de la tumeur, des cellules s'approchent de la matrice, la dégradent et internalisent les molécules de PAI-1 matriciel ;

8. une molécule présente sur la matrice extra-cellulaire à laquelle se fixent les molécules de PAI-1, qui deviennent alors matricielles

- La quantité de PAI-1 matriciel varie énormément d'un point à l'autre le long de la bordure de la tumeur : cela provient du fait que la croissance de la tumeur n'est pas spatialement homogène et ne se produit pas simultanément, et de la même manière, sur l'ensemble du pourtour de la tumeur ; cette observation est compatible avec le fait que l'échappement métastatique est un évènement rare : si PAI-1 est bien impliqué de manière prépondérante dans l'échappement, alors la rareté de l'évènement est vraisemblablement due à la nécessité d'une concentration localement particulièrement élevée, ce qui ne doit donc se produire qu'exceptionnellement (voir figure 2.5).
- La quantité de PAI-1 matriciel est inversement proportionnelle à la vitesse de la croissance de la tumeur : plus la prolifération est lente et plus longues sont les phases d'accumulation du PAI-1 matriciel ; cela suggère que l'environnement de la tumeur, influençant différenciellement la croissance de la tumeur, pourrait jouer un rôle majeur dans le déclenchement de l'échappement métastatique.

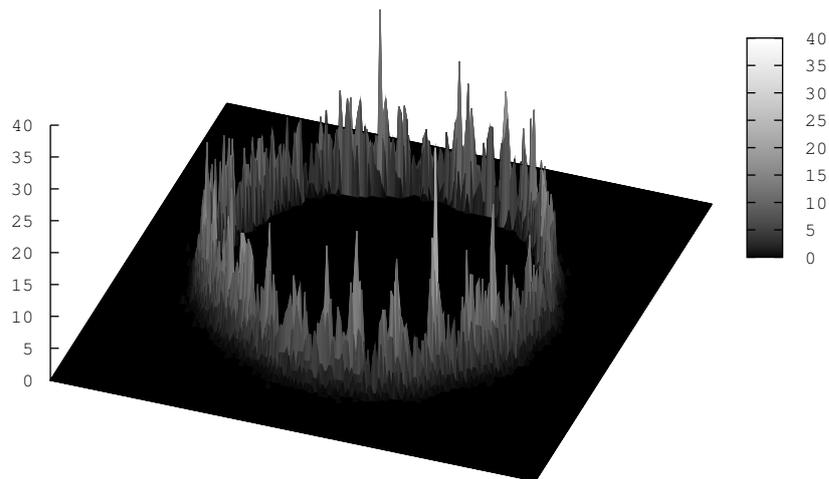


FIGURE 2.5 – Quantité de PAI-1 matriciel déposée autour de la tumeur : la hauteur des pics traduit la plus ou moins forte concentration en PAI-1 matriciel

Publications

Outre les rapports de master mentionnés ci-dessus, ce travail de modélisation et de simulation a donné lieu à plusieurs publications : dans (Malo et al. 2010), on pourra trouver une étude plus détaillée de la dynamique de dépôt du PAI-1 matriciel, avec la comparaison du modèle agent avec un modèle d'équations aux dérivées partielles ainsi qu'un modèle par automates cellulaires ; dans (Lepagnot et Hutzler 2009), on pourra trouver les détails du modèle agrégé introduit pour gagner en performances et permettre la simulation de davantage de détails dans les zones d'intérêt ; dans (Gil Quijano et al. 2009) et (Gil Quijano et al. 2010) enfin, le modèle

est introduit sous l'angle de la modélisation multi-niveaux à base d'agents en le comparant avec deux autres modèles, dont celui qui est présenté à la section suivante, et en proposant d'en abstraire une première typologie des différentes approches agents multi-niveaux de modélisation et de simulation. Nous reviendrons également sur ce modèle dans le chapitre suivant, du point de vue précisément de la modélisation multi-niveaux.

2.3 MODÉLISATION DE LA CROISSANCE URBAINE

Même si le positionnement et la configuration du laboratoire IBISC incitent assez naturellement à développer des applications dans le domaine de la biologie systémique, l'approche à base d'agents n'est pas limitée à ce seul domaine et ses concepts et outils trouvent à s'appliquer aussi bien à de très nombreux autres domaines, parmi lesquels la géographie urbaine. J'ai ainsi mené un travail en collaboration avec l'équipe P.A.R.I.S. du laboratoire Géographie-Cités⁹ en les personnes de Denis Pumain et Anne Bretagnolle, dans le cadre du co-encadrement, avec Jean-Louis Giavitto, de la thèse de Thomas Louail. Celle-ci est consacrée à l'étude, dans le cadre du projet SIMPOP, de la croissance urbaine à différents niveaux d'échelle, depuis le niveau des villes jusqu'à celui des systèmes de villes, sur des périodes de plusieurs siècles.

Historique

Contrairement à la biologie où le travail de modélisation et de simulation est souvent considéré de manière suspecte, la géographie a une longue tradition en la matière. La différence entre les deux domaines provient vraisemblablement du fait que la biologie est une science principalement fondée sur l'expérimentation *in vivo*, la mesure, et finalement la production de données¹⁰, tandis que la géographie est une science principalement fondée sur l'élaboration de théories et de modèles. Le modèle SIMPOP_{NANO}, développé par Thomas Louail est ainsi l'héritier de quinze années de modélisation, depuis le modèle SIMPOP₁ (Bura et al. 1996) qui fut l'une des toutes premières applications de la simulation à base d'agents à la géographie.

SIMPOP₂¹¹ (Pumain et al. 2009) est un projet démarré en 2002 qui donne une transcription calculatoire de la théorie évolutionnaire urbaine (Pumain 1997), pour la mettre à l'épreuve de la simulation. La théorie analyse les systèmes de villes comme des systèmes complexes auto-organisés dont les villes sont les entités principales. Les systèmes de villes, que ce soit à l'échelle régionale, nationale ou continentale, présentent des propriétés remarquables au niveau macro, dont certaines sont particulièrement stables et universelles, comme la structure hiérarchique de la distribution des tailles de villes (connue sous le nom de loi rang-taille). En

9. UMR 8504, <http://www.parisgeo.cnrs.fr/index.php?page=equipe3&langue=fr>

10. en témoignent d'une part les très nombreuses bases de données biologiques (génomiques, protéomiques, etc.), qui se multiplient depuis les années 1980, et dont les volumes de données augmentent de manière exponentielle, d'autre part le développement de nouvelles méthodes de production de données à toujours plus haut débit

11. <http://www.simpop.parisgeo.cnrs.fr>

dissociant un modèle générique, qui encapsule les processus universels, des modèles appliqués, qui encapsulent les processus spécifiques à l'histoire de chacun de ces systèmes, la démarche comparative choisie permet de formaliser un ensemble de facteurs qui permettent de reproduire les différences observées dans les propriétés des systèmes de villes en Europe et aux Etats-Unis.

Question de modélisation

SIMPOPNANO (Louail 2009) fait suite à SIMPOP2 et a pour objectif de simuler l'évolution de l'organisation spatiale interne d'une ville, sur la même période pluri-séculaire que celle de SIMPOP2. L'objectif est de comparer les morphogenèses de villes en Europe et aux Etats-Unis, et d'isoler un ensemble minimal de facteurs permettant de reproduire les différences observées entre ces deux grands types de villes, en termes de motifs de répartition spatiale des densités, des prix et des activités à l'intérieur des villes des deux continents.

Avec SIMPOP3, l'objectif est de coupler les deux modèles précédents en un modèle, multi-agent et multi-niveaux, qui permette d'étudier des dynamiques urbaines simultanément aux niveaux inter- et intra-urbain, et d'articuler les entités associées : le quartier, la ville, et le système de villes. L'idée sous-jacente est que ces niveaux exercent les uns sur les autres des influences réciproques. Étant donnée la multitude des facteurs causant ces influences inter-niveaux, il est difficile de les capturer et de formaliser leur action dans des règles inter-niveaux. Le modèle sert alors à tester des heuristiques sur la nature des inter-influences qu'entretiennent ces niveaux d'organisation du peuplement.

Description du système

Les géographes s'accordent généralement à identifier trois niveaux de description ou d'organisation des systèmes urbains : le niveau *micro* qui est celui des acteurs intra-urbains (individus, ménages, services, maire, etc.) ; le niveau *meso* qui est celui des villes ; le niveau *macro* qui est celui des systèmes de villes. Ce dernier niveau est reconnu comme un niveau émergent qui résulte des « différentes formes d'échanges et d'interaction qui se produisent entre les villes, à plus ou moins longue distance »¹². La théorie évolutionnaire urbaine défendue par les géographes du laboratoire Géographie-Cités, postule que ces interactions entre villes, qui conduisent à la constitution de réseaux d'échanges à un niveau plus global, sont fondées sur des *fonctions urbaines*, produisant différents types de biens (fonctions administratives, résidentielles, d'innovation, etc.) et capables d'interactions selon deux logiques complémentaires : une logique de collaboration par l'échange des biens et services produits avec d'autres fonctions du même type ; une logique de compétition pour l'acquisition des innovations qui apparaissent de manière cyclique dans le système. Une *fonction urbaine* caractérise ainsi le rôle joué par une ville au sein du système, et est associée à une période temporelle d'activité.

12. D.Pumain, chap. 13 « Systèmes de villes et niveaux d'organisation » dans Morphogenèse, P.Bourgine et A.Lesne (eds.), Belin, p 238

Au niveau intra-urbain, différentes thèses s'affrontent pour expliquer la répartition différenciée des entités du niveau micro à l'intérieur de la ville selon des gradients de densité décroissante à mesure que l'on s'éloigne du centre de la ville. On y retrouve cependant généralement la notion d'arbitrage qui doit être effectué par l'entité entre ce que lui coûte son implantation et ce qu'elle lui rapporte potentiellement (en termes d'accessibilité, de prestige, etc.).

Modèle

Le modèle Simpop2

Les *villes* sont les agents principaux du modèle. Elles interagissent en se vendant et en s'achetant des biens et des services associés aux *fonctions urbaines* qu'elles possèdent. Ces interactions spatiales entre villes sont de plusieurs types, et dépendent de la *fonction urbaine* assurant l'interaction. Elles sont médiées par l'intermédiaire de marchés d'échange.

Le modèle simpopNano

Le modèle intègre deux types d'entités : des objets *quartiers*, qui représentent des portions de l'espace intra-urbain, et des agents *fonctions urbaines* qui représentent les types d'activités socio-économiques possédées par la ville. Ces *fonctions urbaines* sont les mêmes que celles qui sont présentes dans SIMPOP2, et sont dotées de comportements complémentaires pour trouver à s'exprimer à ce niveau intra-urbain. Les *fonctions* possèdent un effectif d'actifs à localiser dans la ville, ainsi qu'un budget permettant de payer pour leur localisation. Les quartiers sont reliés dans un réseau à structure dynamique et se différencient par leur accessibilité et par leur composition, qui les rendent plus ou moins attractifs pour les *fonctions*, et plus ou moins chers. Les *fonctions* se différencient par leurs budgets et leurs orientations synergiques.

Le modèle Simpop3

SIMPOP3 inclut des agents à deux niveaux :

- Au niveau le plus « bas », niveau *micro*, sont spécifiés des *agents fonctions* qui sont les mêmes que ceux définis au niveau *méso* mais dotés de comportement supplémentaires leur permettant d'agir au niveau *micro*, c'est-à-dire de se localiser parmi les quartiers de la ville. Ce sont les agents de SIMPOP_{NANO}.
- Au niveau intermédiaire, niveau *méso*, on spécifie des *agents villes*, capables d'interactions entre eux, ainsi que des *agents fonctions*, capables de se localiser parmi les villes, et qui offrent aux villes qui les possèdent de nouvelles capacités d'interaction. Ce sont les agents de SIMPOP2.

L'exécution du modèle SIMPOP3 consiste en l'exécution alternée d'une itération de SIMPOP2 et d'une itération de SIMPOP_{NANO}.

- SIMPOP2 calcule à chaque pas de temps les échanges entre villes, la ventilation spatiale des innovations et la croissance résultante, et

détermine en conséquence l'état suivant de chaque ville : une liste de fonctions, et l'effectif et le budget de chacune.

- Ces sorties sont les données d'entrée de SIMPOP_{NANO}, qui calcule la ventilation des effectifs des fonctions possédées par la ville au sein de ses quartiers. Les fonctions payent leur implantation dans les quartiers grâce à leur budget, calculé au niveau SIMPOP₂, à la suite des échanges avec d'autres villes. En sortie d'itération, SIMPOP_{NANO} produit un indicateur de la qualité de l'implantation des fonctions à l'intérieur de la ville.
- Cet indicateur de « performance spatiale » est pris en compte par les agents-fonctions au niveau SIMPOP₂ pour décider de la ville où elles vont s'implanter. La boucle inter-niveaux est bouclée. Nous modélisons à la fois des causalités descendantes et ascendantes.

Résultats

A l'exécution de SIMPOP₂, la dynamique interactionnelle engendre une spécialisation des villes, une différenciation de leurs trajectoires et donc la taille de leur population. La mesure détermine si ces structures émergentes possèdent les propriétés des systèmes de villes. Pour ce qui est de SIMPOP_{NANO}, la dynamique des localisations des agents-fonctions produit à l'exécution une ville *émergente*, dont il est possible de caractériser la structure spatiale interne au moyen de plusieurs indicateurs : gradients centre-périphérie de densité d'occupation du sol et de prix, coefficient de variation spatiale et coefficients de localisation, etc.

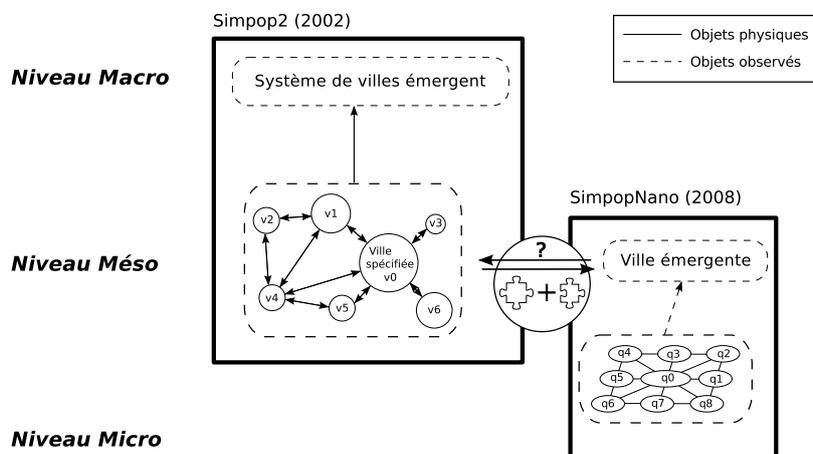


FIGURE 2.6 – L'entité « ville » de SIMPOP₂ et celle de SIMPOP_{NANO} ne correspondent et il faut donc établir une correspondance entre les deux pour construire le modèle multi-niveaux SIMPOP₃

Une des originalités du travail réside dans le couplage entre ces deux modèles, fonctionnant à des niveaux d'organisation différents (ville/système de villes pour le premier, quartier/ville pour le second). Même si l'on pourrait penser en première approche que l'« entité-ville » est commune aux deux modèles et peut donc servir de pont entre eux, il apparaît facilement qu'il ne s'agit pas du même objet ville. L'entité ville constitue en effet l'objet élémentaire de modélisation dans SIMPOP₂ alors qu'elle n'est pas modélisée en tant que telle dans SIMPOP_{NANO}. Elle consti-

tue dans cette dernière un produit émergent de l'interaction entre les quartiers et ne peut être instanciée qu'*a posteriori* par la caractérisation de l'état de l'ensemble du système. L'enjeu consiste donc à réconcilier ces deux visions d'un même objet de manière à intégrer SIMPOP2 et SIMPOP_{NANO} au sein d'un modèle unique multi-niveaux, SIMPOP3 (voir figure 2.6). L'astuce consiste à émettre l'hypothèse que la notion de fonction urbaine, proposée originellement pour modéliser les interactions entre villes dans un contexte de croissance de systèmes urbains, soit également pertinente pour modéliser les acteurs intra-urbains en compétition pour l'accès au sol.

Une autre originalité du travail, du point de vue géographique, réside dans le postulat de processus génériques communs à tous les systèmes de villes et toutes les villes, qui pourraient s'instancier différenciellement selon le système précisément modélisé. Ces différences d'instanciation sont liées à un ensemble de facteurs, ou de paramètres, qui sont soit exogènes au système lui-même (par exemple le contexte historique de développement du système de ville, avec la succession de cycles d'innovation), soit ne sont pas modélisés en tant que tels et sont donc pris comme des paramètres du modèle (par exemple la structure du réseau viaire dans la morphogenèse de villes). L'objectif poursuivi n'est donc pas tant d'observer l'émergence d'une ville ou d'un système de villes comme résultat de l'interaction entre entités de niveau inférieur, mais de déterminer si des paramétrages différents d'un même modèle sont susceptibles de produire des « formes » différenciées superposables à celles qui sont décrites pour différents systèmes (Europe et Etats-Unis par exemple). De ce point de vue, la méthodologie employée dans le cadre du projet SIMPOP2, à savoir un calibrage manuel des paramètres fondé essentiellement sur l'expertise du géographe, ne semble pas adaptée à l'espace de paramétrage gigantesque du modèle. Cet espace de paramétrage est d'autant plus grand que la valeur de bon nombre de paramètres n'est pas figée mais correspond à une donnée historique évoluant au cours de la simulation. Une réflexion sur le thème du calibrage a donc été entreprise par Thomas Louail dans la lignée du travail de thèse de Benoît Calvez (Calvez 2007) que nous évoquerons au chapitre suivant : quelle mesure de la qualité d'un paramétrage, quelle stratégie d'exploration de l'espace de paramétrage, etc. ?

Publications

De même que pour le travail de modélisation précédent, on peut retrouver une description de ce travail de modélisation, sous l'angle de la conception de modèles multi-niveaux, dans (Gil Quijano et al. 2009) et (Gil Quijano et al. 2010). En outre, Thomas Louail a publié les détails du modèle SIMPOP_{NANO} dans (Louail 2009), ainsi qu'une analyse comparée des ontologies en géographie et en informatique pour la modélisation multi-niveaux dans (Pumain et Louail 2009).

DISCUSSION - CONCLUSION

J'ai présenté dans ce chapitre différents exemples de simulation en biologie et en géographie. Plus que les résultats biologiques ou géographiques qu'ils suggèrent, ces recherches mettent surtout en évidence un

certain nombre de manques et de besoins dans le domaine de la modélisation et de la simulation à base d'agents. Comme je le soulignais plus haut, la comparaison avec d'autres approches de modélisation dans le cadre du tutorial sur le switch biologique permet de mettre en exergue certains de ces manques et ces besoins. Mais le travail de simulation appliqué à des cas concrets de systèmes complexes, sous la « pression » de spécialistes du domaine qui cherchent à tester leurs hypothèses et leurs théories, est également un exercice redoutable pour éprouver les limites de son approche de choix.

Parmi les besoins les plus manifestes, on peut en retenir trois qui seront développés au chapitre suivant :

- Le premier concerne l'*exploration de l'espace des paramètres* d'un modèle. Les modèles à base d'agents s'accompagnent en effet souvent d'un très grand nombre de paramètres dont on aimerait bien pouvoir maîtriser l'impact sur les résultats de simulation. On pourra être intéressés notamment à identifier le ou les paramétrages du modèle conduisant au « meilleur » comportement possible du système, selon un critère déterminé (par exemple de produire des résultats de simulation aussi voisins que possible des données d'observation sur le système modélisé). Dans une perspective très différente, on pourra aussi s'intéresser à déterminer, pour l'ensemble des paramétrages, la gamme des comportements possibles du système.
- Ce besoin de calibrage automatique de nos modèles implique d'être capables de « mesurer », de manière également automatique, le comportement des simulations correspondantes. Dans les cas les plus simples, cette mesure peut se ramener à l'évaluation de certains temps ou grandeurs caractéristiques du système. Mais de manière plus générale, mesurer le comportement d'un système complexe nécessite d'être à même de caractériser les phénomènes dynamiques qui s'y produisent, en particulier les phénomènes d'*auto-organisation* ou d'*émergence* de structures de niveau supérieur.
- Enfin, puisque l'on s'intéresse à des systèmes dans lesquels s'entremêlent, de manière très intriquée, les actions et les interactions d'entités et de structures à différents niveaux d'organisation ou d'échelle, il paraît fondamental de pouvoir prendre en compte ces aspects dans des modèles et des simulations multi-niveaux. Corrélativement, il peut dans certains cas être souhaitable de sortir du strict cadre de l'approche à base d'agents au profit d'approches hybrides mêlant le paradigme agent avec d'autres paradigmes de modélisation.

LA SIMULATION À BASE D'AGENTS, POINT DE VUE TRANSVERSAL

SOMMAIRE

3.1	DIFFÉRENTES APPROCHES DE MODÉLISATION	41
3.2	CALIBRAGE DE MODÈLES À BASE D'AGENTS	48
3.3	CARACTÉRISATION DE STRUCTURES ÉMERGENTES	53
3.4	CONCEPTION DE MODÈLES MULTI-NIVEAUX	59
	DISCUSSION - CONCLUSION	67

L'APPROCHE à base d'agents, discrète, locale et spatialisée, présente des caractéristiques et des propriétés qui la distinguent d'autres approches de modélisation et motivent son utilisation privilégiée dans un certain nombre de contextes et pour un certain nombre de systèmes. Nous commencerons par faire le point, dans la section 3.1, sur la manière dont se positionne la simulation à base d'agents par rapport à un certain nombre d'autres paradigmes de simulation, en nous basant notamment sur l'expérience acquise lors des tutoriaux sur la modélisation développés dans le cadre de la série des écoles de *Modélisation et simulation des systèmes complexes biologiques dans le contexte de la génomique*. Nous présenterons ensuite différentes problématiques propres à la simulation à base d'agents (et de manière plus large aux systèmes multi-agents), abordées indépendamment d'un champ disciplinaire spécifique. Nous reviendrons ainsi sur les problématiques de calibrage dans la section 3.2, d'observation et de caractérisation de structures émergentes dans la section 3.3, et enfin de conception multi-niveaux dans la section 3.4.

3.1 DIFFÉRENTES APPROCHES DE MODÉLISATION

Au cours de la série des écoles de *Modélisation et simulation des systèmes complexes biologiques dans le contexte de la génomique* a été développé un tutorial visant à proposer un éventail comparé d'approches de modélisation et de simulation, en appliquant ces approches au même problème de modélisation. C'est dans un premier temps la *bascule génétique du bactériophage lambda* (voir section 2.1) qui a été choisie avant d'en abstraire, dans un deuxième temps un réseau de régulation génétique simplifié consistant en l'inhibition réciproque de deux gènes. Dans le cadre de ces tutoriaux, le propos n'est pas tant de faire avancer la science sur les switchs biologiques que de donner un panorama comparé des principaux paradigmes de modélisation et de simulation dans le domaine de la biologie moléculaire. Ces paradigmes sont les *équations différentielles ordinaires (ODE)*, la *modélisation stochastique*, les *réseaux booléens*, la *théorie des jeux*, la *simulation à base d'agents (ABS)*, les *automates cellulaires (CA)*, les *systèmes de réécriture (MGS¹)*, les *réseaux de Petri hybrides fonctionnels (HFPN)*, et le π -calcul. Sachant que MGS peut lui-même être vu comme une généralisation d'autres modèles parmi lesquels les automates cellulaires, mais aussi les L-systèmes ou les P-systèmes, ces deux dernières formes de modélisation seront également abordées.

L'objet de la section introductive à ce chapitre est de s'appuyer sur ce tutorial, auquel j'ai participé pendant cinq ans pour les parties *agent* et *automates cellulaires*, pour positionner l'approche de simulation à base d'agents par rapport aux autres paradigmes utilisés dans le domaine. Je discuterai en particulier des questions auxquelles un modèle est censé répondre, de l'aspect discret ou continu des différents paradigmes, et enfin de la caractéristique qui me semble essentielle pour distinguer la simulation à base d'agents (et les automates cellulaires) des autres formes de modélisation, à savoir la prise en compte explicite de la notion d'espace.

Dynamique, stationnarité, ou bien ?

La première chose qui distingue, selon moi, un paradigme d'un autre n'est pas de savoir s'il correspond à des modèles discrets ou continus, déterministes ou stochastiques, à des modèles de population ou entités-centrés. La première caractéristique à mon sens correspond au type de questions que l'on peut poser à son modèle. Un modèle, quel qu'il soit, n'a en effet pas d'intérêt en lui-même. Il n'a d'intérêt que parce qu'il peut être interrogé et apporter des réponses aux questions que se pose le modélisateur. De ce point de vue, je situe la principale ligne de partage entre l'approche « qualitative » et l'approche « quantitative » pour caractériser la *dynamique* du système. Les modèles « qualitatifs » s'intéressent à la dynamique et aux états stationnaires du système dans un espace d'états très réduit, permettant de caractériser, à l'aide de *méthodes formelles*, l'ensemble des « trajectoires » possibles pour le système. Les modèles « quantitatifs » s'intéressent pour leur part à la *simulation* de l'évolution du système au

1. « (encore un) Modèle Général de Simulation (de système dynamique) », <http://mgs.spatial-computing.org/>

cours du temps, l'état du système étant décrit sous la forme d'un ensemble de variables quantitatives.

Du côté des méthodes qualitatives, on peut retrouver les réseaux booléens, la théorie des jeux et les réseaux de Petri, tous les autres formalismes se rangeant du côté des méthodes quantitatives. Les réseaux de Petri sont un cas un peu particulier puisque dans leur forme « hybride fonctionnelle » qui est celle du tutorial, ils permettent à la fois de faire une étude qualitative par l'étude des états stationnaires et une étude quantitative par la simulation de l'évolution des concentrations des différents réactants du système. Les équations différentielles constituent quant à elles un autre cas un peu intermédiaire puisque leur formulation mathématique permet, dans certains cas (c'est-à-dire quand le système reste relativement simple), de faire des études *théoriques* sur les états stationnaires et leur stabilité, et sur les conditions de bifurcation du système.

Discret, continu, ou bien ?

Un autre critère qui est souvent invoqué pour déterminer des grandes classes de modèles est la notion de continu ou de discret. L'approche par équations différentielles est ainsi classiquement présentée comme une approche continue, tandis que l'approche à base d'agents est, tout aussi classiquement, présentée comme une approche discrète. Est-ce bien si sûr ? Un système d'équations différentielles que l'on résoud *numériquement* à l'aide d'un schéma d'intégration tel que la méthode d'Euler, devient discret du point de vue de l'écoulement du temps. A l'inverse, un système de simulation à base d'agents à événements discrets repose sur une vision d'un temps qui s'écoule de manière continue, avec des agents dont l'état change de manière discrète à l'occasion d'événements ponctuels. Il est donc absolument fondamental de préciser ce que l'on entend par *discret* ou *continu*, si l'on veut pouvoir retenir cet aspect comme critère de classification pertinent. Et pour commencer, il faut définir la « chose » à laquelle on attribue ou non la qualité de continuité. Est-ce l'état du système ? Est-ce l'écoulement du temps ? Est-ce l'espace au sein duquel évolue le système ? Ou peut-être les trois à la fois ? Je vais maintenant examiner ces trois aspects successivement, de manière à justifier la classification que je propose et qui est schématisée sur la figure 3.1.

Etat continu, état discret, ou bien ? Quand on parle « classiquement » de modélisation continue ou discrète, on fait généralement référence à l'état du système décrit de manière continue ou discrète. Dans le cas ODE, cet état est décrit sous la forme d'un ensemble de variables réelles, qui décrivent les concentrations des différentes espèces chimiques impliquées dans le modèle. Il s'agit donc d'une description continue de l'état du système. Les règles d'évolution du système, à savoir les équations différentielles elles-mêmes, décrivent une évolution également continue de ces variables réelles. Dans le cas de l'approche à base d'agents, l'état du système est décrit de manière discrète puisqu'il consiste en la juxtaposition des états d'un ensemble d'entités (ici des molécules) qui composent le système. La dynamique d'évolution de ces entités, leur comportement, est également discrète comme nous le verrons au paragraphe suivant.

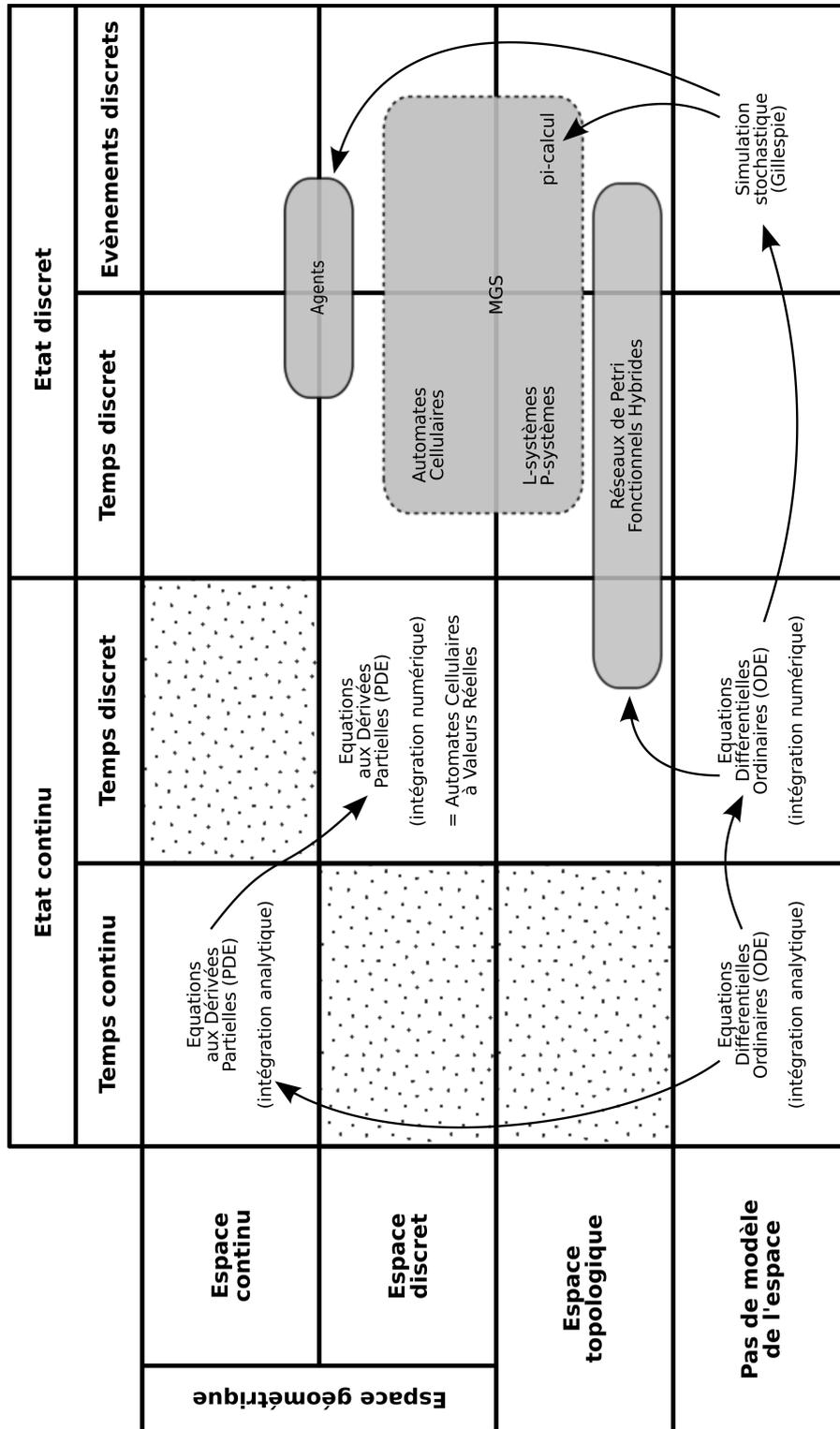


FIGURE 3.1 – Tableau résumé des grandes classes de paradigmes de modélisation et de simulation de systèmes complexes, en particulier dans le domaine de la biologie moléculaire

Qu'en est-il alors de la modélisation stochastique? Celle-ci, tout comme l'approche par équations différentielles, décrit le système sous la forme d'un ensemble de variables « globales » correspondant aux quantités en présence des différentes espèces chimiques. Mais là où les ODE décrivent des *concentrations continues*, la modélisation stochastique décrit des *nombres entiers* de molécules. L'état est donc décrit de manière discrète, comme c'est le cas également pour le π -calcul ou l'approche de simulation par réécriture (MGS), cette dernière décrivant le système sous la forme d'un *multi-ensemble* de molécules, autrement dit un ensemble dans lequel chaque élément peut être présent en plusieurs exemplaires (de même que chaque espèce moléculaire est représentée par un grand nombre de molécules identiques).

Les modèles CA et HFPN sont pour leur part à cheval entre les deux catégories. Dans leur forme originelle, les automates sont des modèles discrets puisqu'ils consistent en un ensemble fini de « cellules », chacune caractérisée par un état discret. Des variantes existent cependant où chaque cellule est associée à une (ou plusieurs) variable(s) réelle(s), le système dans son ensemble pouvant alors être décrit comme un ensemble de sous-systèmes localement continus. Cela place selon moi les automates cellulaires à valeurs réelles dans la catégorie des systèmes à état continu puisque chaque sous-système se comporte localement comme un système à état continu. Les modèles HFPN enfin, peuvent à la fois modéliser des quantités continues, typiquement pour modéliser des concentrations de molécules (à la manière des ODE), et des entités discrètes, généralement pour modéliser des cellules. C'est la raison pour laquelle j'ai placé ces modèles à cheval entre les deux catégories.

Temps continu, temps discret, ou bien ? Le modèle ODE est, par essence, un modèle continu, aussi bien du point de vue de l'état du système que du point de vue du temps. Ainsi, une équation différentielle $f(x) = \frac{dx}{dt}$ peut-elle se résoudre *analytiquement* sous la forme d'une fonction $x(t)$ qui donne la valeur de la grandeur x pour n'importe quelle valeur réelle de t . Cependant, comme le rappelle (Mestivier 2007), cette intégration analytique n'est « très souvent pas possible, même pour des fonctions simples ». Il faut alors faire appel à des schémas plus ou moins complexes d'intégration numérique, qui consistent à découper le temps en petits intervalles de temps, et à calculer la succession des petites variations de la grandeur x (ainsi que toutes les autres grandeurs modélisées) pour chacun de ces intervalles, à partir d'une situation initiale x_0 . Même si le modèle ODE est en théorie un modèle à temps continu, il est ainsi en pratique, la plupart du temps, un modèle à temps discret. Le modèle HFPN est de même un modèle à temps discret puisque les *transitions continues* de ces modèles ne se déclenchent pas de manière *continue* mais de manière *répétée* et sans délai entre chaque transition, appliquant ainsi un schéma d'intégration similaire à ceux qu'on retrouve dans les ODE.

Concernant les modèles à états discrets, il n'apparaît pas très pertinent de parler de temps continu puisqu'aucun modèle ne fait évoluer l'état du système de façon continue. On peut en revanche distinguer les deux grands mécanismes de gestion du temps que sont la *simulation à temps discret* et la *simulation à événements discrets*. Dans la première, le temps pro-

gresse par petits intervalles de temps successifs, comme dans les intégrations numériques d'*ODE*. Dans la seconde, le temps progresse de manière instantanée jusqu'au prochain évènement programmé. Les approches à temps discret sont les approches de réécriture (L-systèmes, P-systèmes), les automates cellulaires et autres modèles de Potts cellulaires (*CPM*). Les approches à évènements discret sont le π -calcul et la modélisation stochastique. Les approches à base d'agents, l'approche *HFPN* ou encore le framework *MGS* peuvent, selon les cas, relever de l'un ou l'autre de ces catégories.

Espace continu, espace discret, ou bien ? Les deux approches les plus populaires en biologie, les approches *ODE* et stochastiques se passent tout simplement de modélisation de l'espace. . . Une des raisons en est que l'essentiel des connaissances en biologie moléculaire a pendant longtemps été fourni par des mesures *in vivo* pour lesquelles les cellules sont broyées et centrifugées dans un tube à essai, de manière à obtenir une solution homogène. L'hypothèse de base, en modélisation, est donc que la solution est homogène et que toutes les molécules peuvent interagir sans contraintes les unes avec les autres.

Dans bon nombre d'autres approches de modélisation (réécriture, π -calcul, *HFPN*), l'espace est pris en compte d'un point de vue topologique, c'est-à-dire de manière relative, sous la forme de relations de voisinage entre les entités, et non de manière absolue, sous la forme de positions dans l'espace. Selon les cas, l'idée est de reproduire certaines structures topologiques remarquables (les structures végétales notamment avec les L-systèmes) ou de modéliser l'existence de compartiments limitant l'interaction entre les molécules (π -calcul, P-systèmes, *HFPN*).

Dans une troisième classe de modèles enfin, l'espace est considéré d'un point de vue géométrique, c'est-à-dire qu'il est doté d'une métrique et d'un système de coordonnées. Les agents et les automates cellulaires entrent dans cette dernière catégorie, de même que les équations aux dérivées partielles (*PDE*) qui peuvent être utilisées pour étendre les *ODE* sous forme spatialisée. De même que les *ODE*, les *PDE* sont rarement intégrées de manière analytique, et il faut alors avoir recours à un modèle d'intégration numérique. Un tel modèle peut être constitué par les *CA* à valeurs réelles puisque, comme le rappelle (Wolfram 1988), « les automates cellulaires fournissent des modèles discrets relativement généraux pour les systèmes homogènes à interactions locales. Ils peuvent être considérés comme des idéalizations des équations aux dérivées partielles, dans lesquelles le temps et l'espace sont discretisés ».

Pourquoi l'espace est important...

Si l'on regarde la figure 3.1, il apparaît que ce qui particularise l'approche agent, avec les automates cellulaires, c'est de correspondre à une description discrète du système modélisé, plongée dans un espace géométrique explicite (qu'il soit discret ou continu). Il s'agit donc bien d'une approche *locale*, mais pas seulement dans le sens d'opposée à *globale*. Elle est certes locale parce qu'elle repose sur une description individuelle des entités qui composent le système et non sur une description globale de

l'ensemble des entités de même type. Mais elle est aussi locale parce que ces entités sont *localisées* dans un espace qui a une signification *physique* et non placées ensemble dans un espace abstrait comme c'est le cas des approches de type p-systèmes, π -calcul ou encore modélisation stochastique. Alors en quoi est-ce si important ?

Parce que la diffusion est contrainte Cela me semble important tout d'abord parce que les deux approches de loin les plus populaires en biologie, à savoir la modélisation par *ODE* d'une part, la modélisation stochastique d'autre part, reposent sur des hypothèses qui semblent extrêmement discutables. Hypothèses que l'on retrouve également de manière implicite dans les réseaux *HFPN*, puisqu'ils utilisent des schémas d'intégration numérique d'équations différentielles, et dans le π -calcul, qui utilise la même stratégie de simulation que la modélisation stochastique. Ces différentes approches font toutes l'hypothèse que les espèces chimiques en présence sont placées dans une enceinte parfaitement homogène, dans laquelle toute molécule peut donc interagir librement et sans contrainte avec n'importe quelle autre molécule. Le problème est qu'une cellule biologique n'a pas grand chose à voir avec cette description idéale. La cellule n'a en effet rien d'un espace vide. Outre le fait qu'elle est densément remplie de macromolécules de nature et de taille diverses qui contraignent la diffusion (Goodsell 2009), la cellule est également peuplée d'organites divers dont les membranes lipidiques limitent les échanges entre le milieu intérieur et le milieu extérieur.

Parce que le milieu est hétérogène Le corollaire du point précédent est que le milieu intra-cellulaire est également hétérogène. Or un certain nombre d'études (Durrett et Levin 1994, Le Page et Cury 1996, Van Dyke Parunak et al. 1998) suggèrent que le fait de pouvoir prendre en compte ces hétérogénéités, grâce à une approche locale et spatiale comme l'approche à base d'agents, permettait de rendre compte de certains effets auto-catalytiques locaux, conduisant à des scénarios totalement différents de ceux prédits par les modèles de type *ODE*. (Shnerb et al. 2000) présentent notamment un modèle proie-prédateur dans lequel le modèle *ODE* prédit l'extinction des proies tandis que le modèle agent prédit au contraire une extension de la population de ces dernières. L'explication avancée est que la densité moyenne des proies est inférieure au seuil leur permettant de survivre dans le modèle *ODE*. Dans un modèle spatialisé cependant, une concentration localement plus importante de proies leur permet de se reproduire en résistant à la pression des prédateurs, et permet à des communautés de se développer localement, et finalement de conquérir de nouveaux territoires. On peut comparer métaphoriquement le phénomène aux cristaux de glace qui se forment autour de poussières minuscules. Sans ces poussières, la glace ne peut pas se former. De même dans nos simulations, si tout est parfaitement homogène, un certain nombre de dynamiques complexes qui sont caractéristiques du vivant ne peuvent pas se produire.

Parce que la spatialisation modifie la dynamique Il n'est pas indifférent que des réactions se produisent sur un support cellulaire associé à une certaine topologie plutôt qu'à une autre. Il est bien connu notamment que la topologie de la grille d'un automate cellulaire (carrée ou triangulaire ou hexagonale) modifie potentiellement la dynamique des phénomènes modélisés. Les grilles carrées ou triangulaires sont en effet moins isotropes que les grilles hexagonales et ne permettent pas, par exemple, de simuler de manière satisfaisante des phénomènes d'écoulement de fluide. Dans le domaine de la biologie, (Mallavarapu et al. 2009) montrent que les patterns d'expression des gènes chez l'embryon de la Drosophile varient en fonction de la topologie du tissu cellulaire sur lequel leurs équations différentielles sont appliquées. De manière similaire, j'ai pu montrer, sur un modèle simplifié de switch biologique où deux gènes x et y s'inhibent mutuellement, que l'introduction de l'espace dans le modèle *ODE* changeait radicalement les états stables du système. Le modèle *ODE* prévoit qu'il ne peut y avoir que deux états stationnaires stables, celui où x domine et où y n'est plus exprimé, et celui où y domine et où x n'est plus exprimé, ainsi qu'un état stationnaire instable où x et y sont présents en quantités exactement égales. En distribuant les équations différentielles sur un automate cellulaire à valeurs réelles et en ajoutant un terme de diffusion entre les cellules, j'ai pu étudier l'influence de la spatialisation sur la dynamique du système. J'ai alors obtenu la plupart du temps, non pas des systèmes homogènes dans lesquels l'un des deux gènes domine, mais des patterns plus ou moins complexes dans lesquels l'un des gènes domine *localement* avec des zones de transition dans lesquels on peut trouver toutes les proportions relatives possibles des gènes x et y en équilibre (voir figure 3.2).

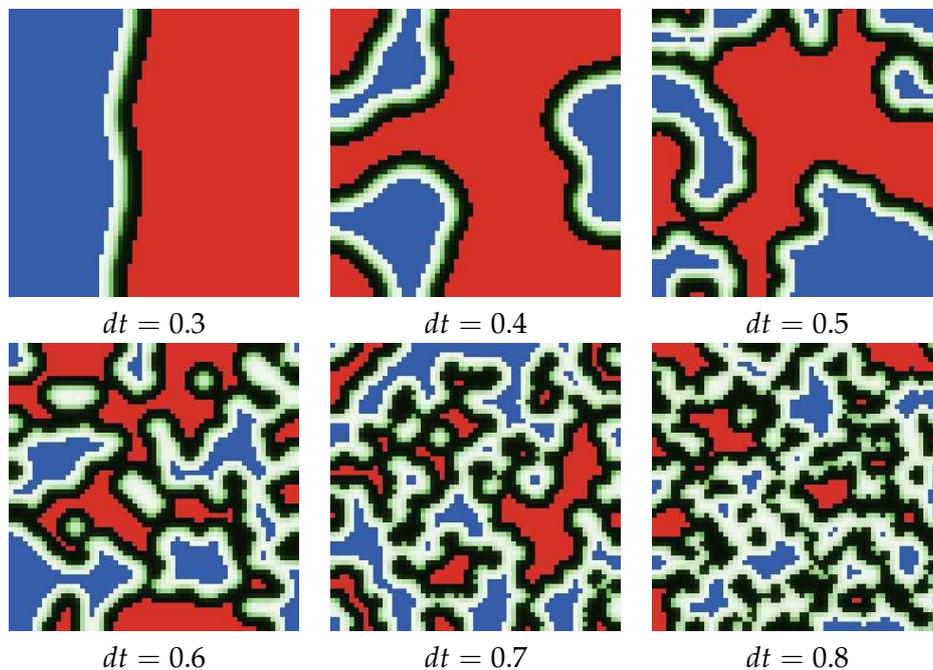


FIGURE 3.2 – Configurations spatiales stables, pour différentes finesses de discretisation des équations différentielles (variation des valeurs de dt)

Parce que les phénomènes modélisés sont spatiaux En biologie, une grande partie des phénomènes que l'on peut souhaiter modéliser ont des propriétés de nature spatiale. Il peut s'agir de la morphogenèse de patterns et de structures à une, deux ou trois dimensions obtenues par l'évolution dans le temps de structures géométriques. Il peut s'agir de cellules dont le comportement sera orienté selon une certaine direction, soit par les cellules elle-mêmes qui sont polarisées (c'est le cas par exemple des cellules cancéreuses 2.2 qui externalisent les molécules de PAI-1 et les récepteurs à PAI-1 du même côté de la cellule), soit par l'environnement dans lequel des gradients en certaines molécules induisent des réponses dirigées chez les cellules. Il peut s'agir encore de transformations morphologiques de cellules sous l'action de leur micro-environnement, comme dans le cas de l'échappement métastatique de cellules amiboïdes. La liste n'est bien évidemment pas exhaustive mais illustre le besoin croissant en modèles spatialisés pour la simulation des systèmes biologiques. Les chapitres suivants illustrent quant à eux trois problématiques que j'ai étudiées dans ce cadre avec trois étudiants en thèse : Benoît Calvez pour le calibrage de modèle, Thomas Moncion pour la caractérisation automatique de phénomènes émergents et Thomas Louail pour la conception de modèles multi-niveaux.

3.2 CALIBRAGE DE MODÈLES À BASE D'AGENTS

Même si Benoît Calvez n'a travaillé directement sur aucun des projets de simulation décrits au chapitre 2, il s'est intéressé au cours de sa thèse (Calvez 2007) à la thématique du calibrage dans les simulations à base d'agents. Il s'est attaché à développer une approche aussi générale que possible en essayant, par rapport notamment à des approches de type « boîte noire », d'exploiter au mieux les caractéristiques des simulations à base d'agents afin d'accélérer le processus d'optimisation.

Problématique

Dans le domaine de la simulation à base d'agents, le calibrage consiste à choisir les paramètres d'un modèle de manière à ce que la simulation correspondante fournisse les « meilleurs résultats » possibles. De ce point de vue, le calibrage n'est lui-même qu'un des aspects de ce que l'on peut désigner plus largement sous le vocable d'*exploration de l'espace des paramètres*. Nous avons pu entrevoir au chapitre 2 différents besoins liés à cette idée d'exploration de l'ensemble des paramétrages possibles d'un modèle. Dans le cas de la simulation du bactériophage λ , il s'agissait de montrer que l'on pouvait trouver un paramétrage du modèle compatible avec l'existence de plusieurs « trajectoires » possibles du système (lyse/lysogénie). Dans le cas de la simulation de tumeurs cancéreuses, il ne s'agit pas de calibrage à proprement parler mais plutôt d'étude de sensibilité puisque le problème consistait à analyser la robustesse du phénomène étudié (ceinture de PAI-1 avec une très forte variabilité de la concentration locale de PAI-1) vis-à-vis des variations de paramétrages. Dans le cas de SIMPOP3, le calibrage consiste à identifier des jeux de paramètres produisant des villes ou des systèmes de villes différenciés, dont

les caractéristiques mesurées sont aussi proches que possibles des données connues sur les villes ou systèmes de ville étudiés (Europe vs. Etats-Unis).

La problématique de calibrage apparaît comme particulièrement importante pour la simulation à base d'agents, mais également particulièrement complexe à mettre en œuvre du fait de la conjonction de différents facteurs :

- le premier est le nombre généralement très important de paramètres qui déterminent la dynamique globale du système. Même si l'approche à base d'agents procède, le plus souvent, en essayant de s'approcher au plus près du système modélisé, il arrive fréquemment qu'un certain nombre de paramètres pertinents pour le modèle n'aient pas été, ou ne puissent pas être, mesurés. S'ils l'étaient, ils cesseraient d'être des paramètres pour devenir des constantes du modèle. Par ailleurs, un certain nombre de paramètres, que l'on pourrait qualifier d'« artificiels » n'ont pas de correspondance directe dans le monde réel du fait que les mécanismes précis ne sont pas connus ou que des abstractions ont été introduites dans le modèle. Tout ceci résulte en un espace de paramétrage gigantesque ;
- les différents paramètres ne sont pas indépendants les uns des autres, une modification de l'un des paramètres entraînant potentiellement l'invalidation des autres paramètres précédemment calibrés. L'optimal peut ainsi être associé à un ratio particulier entre deux paramètres, et non à une valeur particulière pour l'un ou l'autre des paramètres. La conséquence est d'une part que tous les paramètres doivent être calibrés de manière simultanée, d'autre part que l'espace des solutions est potentiellement infini (si c'est un ratio entre deux paramètres qui est important, il existe une infinité de valeurs pour ces deux paramètres telles que le rapport entre les deux soit égal à une valeur donnée) ;
- la dynamique des systèmes est non-linéaire, ce qui implique que d'infimes variations de certains paramètres peuvent avoir un impact considérable sur la dynamique et les états d'équilibre du système. A l'inverse du point précédent, cela a pour conséquence directe un espace de solutions potentiellement très réduit ;
- la dynamique des systèmes est le plus souvent stochastique, deux exécutions successives d'un même modèle pouvant conduire à des évolutions, voire à des situations d'équilibre différentes. Il en résulte un espace de solutions difficile à caractériser ;
- le temps de simulation d'un modèle à base d'agents est souvent long, voire très long, du fait du nombre potentiellement très grand d'agents simulés. Le temps nécessaire à évaluer un jeu de paramètres pourra donc être exorbitant si l'on y ajoute la nécessité de simuler plusieurs fois le même modèle pour tenir compte de la stochasticité évoquée précédemment ;
- enfin, il n'est pas possible de définir *a priori* et de manière universelle ce que l'on entend par « bon résultat ». Il est d'autant plus difficile de pouvoir l'évaluer de manière automatique. . .

Positionnement

Différentes méthodes ont naturellement été proposées pour explorer automatiquement l'espace des paramètres de modèles à base d'agents. On peut de manière rapide les regrouper en deux grandes catégories : les approches de type « boîte noire » qui ne font pas d'hypothèses sur la nature du système modélisé ; les approches de type « boîte blanche » qui intègrent au contraire des connaissances sur le modèle de manière à réduire la taille de l'espace des paramètres et limiter ainsi l'exploration.

Dans l'approche de type « boîte noire », la plus répandue, un jeu de paramètres est évalué en lui associant la valeur d'une *fonction objectif*. Cette fonction objectif doit être définie par le modélisateur avant de lancer le processus de calibrage et doit malgré tout incorporer une certaine connaissance sur le modèle puisqu'elle est censée traduire la qualité de la simulation correspondant au jeu de paramètres testé. Formulé autrement, il s'agit de mesurer la plus ou moins bonne adéquation entre les résultats d'une simulation et les objectifs qui ont conduit à l'élaboration du modèle. Parmi ce type d'approche, on peut citer le « BehaviorSpace » de la plateforme NETLOGO (Wilensky 1999), la « parameter sweep infrastructure » de (Brueckner et Van Dyke Parunak 2003) ou encore les nombreux travaux se basant sur différentes métaheuristiques d'optimisation tels que le recuit simulé (Valente et al. 2008), les algorithmes génétiques (Duboz et al. 2010), la méthode de Monte-Carlo (Sallans et al. 2003) ou encore l'optimisation évolutionnaire multi-objectif (Narzisi et al. 2006, Rogers et von Tessin 2004). Benoît Calvez a lui-même expérimenté l'utilisation d'algorithmes génétiques pour répondre à ce problème de calibrage (Calvez et Hutzler 2005a;c).

L'approche de type « boîte noire » est générale et fonctionne potentiellement pour tout type de simulation, mais requière l'exécution d'un grand nombre de simulations et atteint ses limites pour les modèles possédant de très nombreux paramètres et les simulations très longues. Le calibrage de type « boîte blanche » (Fehler et al. 2004; 2006) propose de son côté d'exploiter des connaissances sur les propriétés structurelles du modèle et les inter-dépendances entre paramètres pour réduire à la fois la taille de l'espace des paramètres et le temps de simulation. L'idée principale consiste à décomposer le modèle en sous-modèles qui pourront être calibrés indépendamment avant d'être fusionnés pour reconstituer le modèle initial. Les étapes de décomposition et de fusion sont cependant très délicates et requièrent une expertise importante, à la fois sur le système modélisé et sur le processus de calibrage lui-même.

Démarche

Par rapport à ces deux types de méthodes, l'idée principale de l'approche d'*Optimisation Dichotomique Adaptative*, ou ODA, que nous avons proposée avec Benoît Calvez est d'exploiter le parallélisme présent de manière inhérente dans la plupart des modèles à base d'agents. Ceux-ci sont en effet le plus souvent constitués d'une ou plusieurs populations d'agents dotés de comportements « homogènes ». Plutôt que de considérer que tous les agents doivent être paramétrés de manière identique, nous proposons que, pour une simulation donnée, les différents agents

de même type peuvent être initialisés individuellement avec des jeux de paramètres différents. Au cours d'une simulation, plutôt que d'évaluer un jeu de valeurs de paramètres de façon individuelle, nous pouvons alors évaluer différents jeux de paramètres en parallèle dans un seul modèle au sein d'une même simulation. L'idée sous-jacente est que le résultat d'une simulation sera d'autant meilleur que la simulation compte de « bons » agents, c'est-à-dire des agents dont le paramétrage conduit à un comportement collectivement efficace. D'une certaine manière, l'idée est similaire au principe des algorithmes d'optimisation par colonies de fourmis (Dorigo et Di Caro 1999).

Une deuxième idée est d'explorer l'espace de paramètres en fonction de l'intérêt potentiel des différentes régions de l'espace. Tirant inspiration de la recherche dichotomique, nous considérons qu'un espace de paramètres de dimension n (n paramètres indépendants) est initialement divisé en hypercubes de dimensions n . D'un point de vue pratique, l'ensemble de définition de chaque paramètre est initialement divisé en un nombre fixé d'intervalles identiques. Lors de la création d'un modèle, pour chaque agent, la valeur de chaque paramètre est choisie de façon aléatoire parmi les intervalles composant l'ensemble de définition du paramètre. Le modèle est ensuite évalué de la même manière que pour l'optimisation en boîte noire, c'est-à-dire en exécutant une ou plusieurs simulations (en fonction de la stochasticité) et en calculant la valeur moyenne de la fonction objectif pour ce modèle. Mais plutôt que de récompenser le modèle lui-même, ce sont les intervalles dans lesquels les valeurs des paramètres ont été choisies pour les agents du modèle qui sont récompensés : pour chaque paramètre, et pour chaque intervalle, la récompense est proportionnelle à la fonction objectif globale du modèle et au nombre d'agents qui ont des valeurs de paramètres comprises dans l'intervalle. Pour chaque paramètre individuel, nous pouvons alors diviser ou fusionner les différents intervalles en fonction des récompenses qu'ils ont reçues. Si un intervalle a reçu en moyenne de fortes récompenses, cela montre que cet intervalle est une zone intéressante de l'espace des paramètres. L'intervalle correspondant peut alors être divisé en deux sous-intervalles afin d'affiner l'évaluation sur cette zone. A l'inverse, si deux intervalles adjacents reçoivent en moyenne des récompenses faibles, cela montre que ces intervalles correspondent à des zones de l'espace de paramètres de faible intérêt. Ces intervalles peuvent être alors fusionnés afin de ne pas perdre de temps dans l'exploration de cette zone.

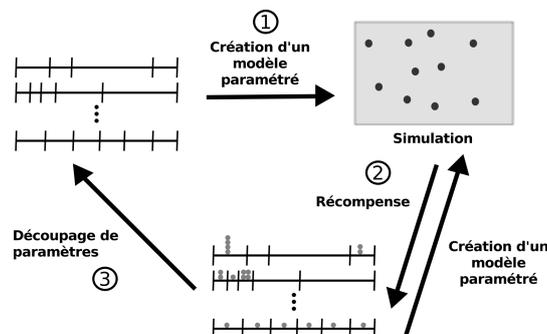


FIGURE 3.3 – Schéma résumé de la méthode ODA

Le processus global de l'optimisation dichotomique adaptative se déroule de la façon suivante (voir la figure 3.3) : à partir des paramètres découpés en intervalles, un modèle est créé (figure 3.3 (1)); puis le modèle est simulé, sa fonction objectif calculée et les intervalles correspondants sont ensuite récompensés (figure 3.3 (2)). Un nouveau modèle est généré et l'étape est itérée jusqu'à que les différents intervalles reçoivent suffisamment de récompenses pour que l'évaluation devienne significative (cette étape peut aussi être distribuée automatiquement sur plusieurs ordinateurs). Pour chacun des paramètres, et indépendamment des autres, le meilleur intervalle (celui ayant les récompenses les plus élevées en moyenne) est choisi, puis est divisé en deux (figure 3.3 (3)). L'ensemble du processus est itéré jusqu'à stabilisation.

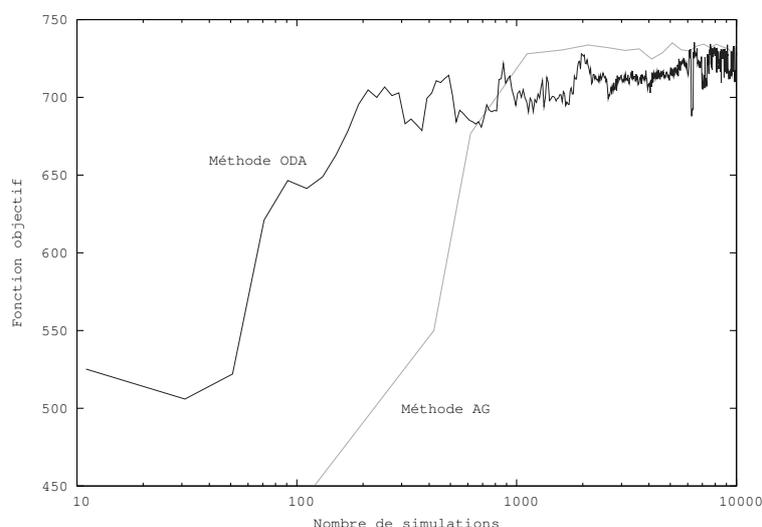


FIGURE 3.4 – Performances comparées des méthodes de calibrage par Algorithme Génétique (AG) et par Optimisation Dichotomique Adaptative (ODA) : évolution de la fonction objectif en fonction du nombre d'exécutions de la simulation

Résultats

L'algorithme ODA a été évalué sur différents modèles jouets de la bibliothèque de NETLOGO (Wilensky 1999). Par rapport à l'approche à base d'algorithmes génétiques (Calvez et Hutzler 2005a), ce nouvel algorithme présente deux avantages essentiels : le premier est de présenter une convergence sensiblement plus rapide en termes de nombre de simulations nécessaires (voir figure 3.4); le deuxième est de fournir, non pas seulement une valeur de paramètre en fin d'optimisation, mais surtout une cartographie de l'espace de paramétrage. La figure 3.5 présente ainsi l'évolution des divisions d'un paramètre. Au départ de l'algorithme, le paramètre est divisé en dix intervalles de même taille, divisions qui évoluent ensuite lors de l'exécution de la méthode, convergeant rapidement vers une valeur précise. Ceci illustre un des intérêts de la méthode : l'exploration démarre en considérant le paramètre en entier avant de se focaliser sur les valeurs les plus intéressantes, tout en conservant la possibilité d'évaluer les valeurs a priori moins intéressantes. Dans ce cas de paramètres qui n'ont que peu d'influence sur les résultats de simulation,

il n'y a pas de convergence vers une valeur unique mais au contraire des divisions distribuées sur la largeur du paramètre de façon régulière.

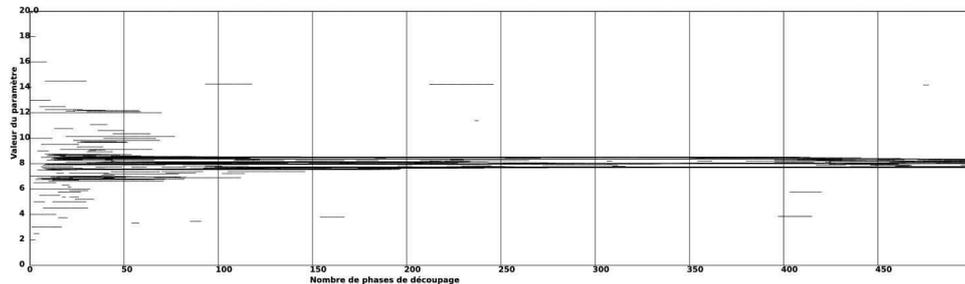


FIGURE 3.5 – Évolution des divisions d'un paramètre du modèle

Publications

Les travaux concernant le calibrage de modèles à base d'agents ont été présentés dans différents articles détaillant principalement les deux approches développées par Benoît Calvez : le lecteur intéressé pourra ainsi trouver les détails de l'approche utilisant les algorithmes génétiques dans (Calvez et Hutzler 2005a;c;b) ; les détails de l'approche par Optimisation Dichotomique Adaptative pourront quant à eux être trouvés dans (Calvez et Hutzler 2007a;b; 2008). La thèse de Benoît Calvez (Calvez 2007) regroupe naturellement l'ensemble de ces travaux ainsi que d'autres encore.

3.3 CARACTÉRISATION DE STRUCTURES ÉMERGENTES

Dans la section précédente, j'ai évoqué l'idée d'évaluer la qualité d'une simulation à travers le calcul d'une fonction objectif. Dans les cas les plus simples, il peut s'agir de mesurer une ou plusieurs valeurs caractéristiques de l'état du système, et de comparer ces mesures avec les mesures correspondantes pour le système réel. On peut calculer pour cela la distance entre les deux vecteurs de valeurs, par exemple par la méthode des moindres carrés. Le calcul de la fonction objectif est cependant beaucoup moins simple dans le cas général, et l'on s'intéressera souvent à la production, par la simulation, d'un comportement de nature qualitative tel que l'occurrence de certains phénomènes émergents, l'apparition de phénomènes cycliques ou encore l'existence potentielle de plusieurs états d'équilibre. L'objet de la thèse de Thomas MONCION était ainsi de développer des méthodes et des outils permettant de détecter et de caractériser, de manière automatique, l'apparition de phénomènes émergents au sein de simulations à base d'agents (Moncion 2008).

Problématique

Au-delà de la problématique de calibrage, dans le cadre de laquelle il est nécessaire de développer des outils permettant l'utilisation de fonctions objectif plus élaborées que la simple mesure d'une propriété globale

du système, la caractérisation des phénomènes se produisant dans une simulation à base d'agent est absolument essentielle pour simplement comprendre *ce qui se passe* et *comment* cela se passe. L'enjeu est d'enrichir la seule visualisation en apportant un ensemble complet de descripteurs permettant de maximiser les enseignements que le modélisateur peut tirer d'une simulation. En améliorant la compréhension de la nature exacte des phénomènes modélisés, l'objectif est de favoriser un retour d'expérience plus riche du point de vue de la simulation et de permettre un transfert plus rapide pour l'application des processus observés à la conception de systèmes à base d'agents. Comme le soulignent (Bonabeau et al. 1995a) en conclusion de leur revue sur les phénomènes émergents, « il est nécessaire de disposer d'un framework pour caractériser l'émergence, en particulier si l'on veut aller au-delà de la simple prise de conscience que des choses « émergent » dans le monde. »

Une des caractéristiques des systèmes complexes, par opposition aux systèmes qui seraient seulement « compliqués », réside dans le fait que leur structure n'est pas conçue et figée a priori mais est le résultat d'un double mouvement causal, ascendant et descendant : la causalité ascendante correspondant au fait que des structures observées à un certain niveau d'organisation peuvent être pensées comme le résultat émergent des interactions localisées entre les entités du système au niveau immédiatement inférieur ; la causalité descendante correspondant au fait que les structures à un certain niveau sont également contraintes par les structures des niveaux supérieurs et/ou l'environnement. La structure de tels systèmes dynamiques est donc elle aussi dynamique, ce qui correspond à la notion de *Systèmes Dynamiques à Structure Dynamique* ((DS)²) introduite par (Giavitto 2003).

Il est pour cela essentiel, lorsque l'on étudie les systèmes complexes, d'élucider les mécanismes gouvernant la structuration dynamique et émergente d'un système. *L'auto-organisation* et *l'émergence* sont couramment invoqués comme les principaux processus de structuration des systèmes complexes, même s'ils sont tous deux délicats à définir, tant les définitions proposées sont multiples, souvent complémentaires mais potentiellement contradictoires. L'auto-organisation est souvent décrite comme une augmentation de l'ordre, mesurée par exemple par une diminution de l'entropie du système, sans que le processus de structuration soit guidé par un contrôle externe. Nous nous appuyons pour notre part sur la définition générale donnée par (De Wolf et Holvoet 2004), qui dit que « l'auto-organisation est un processus dynamique et adaptatif par lequel des systèmes acquièrent et maintiennent une structure par eux-mêmes, sans contrôle externe ». L'émergence pour sa part est souvent caractérisée, en paraphrasant abusivement Aristote², par le fait que *le tout est plus que la somme des parties*. L'idée exprimée est que les entités locales produisent un comportement global qui ne peut être déduit de l'étude des entités locales, ou bien que le tout acquière des propriétés qui ne sont pas présentes de manière intrinsèque dans les parties. La notion d'émergence

2. « En effet, pour toutes les choses composées de plusieurs parties, et où le Tout qu'elles forment n'est pas simplement un amas, mais où il y a un total qui est quelque chose indépendamment des parties, il faut bien qu'il y ait une cause à l'unité qu'elles présentent. » Aristote, *Métaphysique* 8.6 1045a7-10, traduction de J. Bathélemy-Saint-Hilaire

fait depuis longtemps l'objet d'un débat passionné sans qu'un consensus puisse réellement *émerger* (Bonabeau et al. 1995a, Deguet et al. 2006), et il ne s'agit pas ici de proposer ma propre définition de l'émergence. Je m'en tiendrai à nouveau à la définition de (De Wolf et Holvoet 2004), qui notent qu'« un système exhibe de l'émergence lorsque des émergents cohérents apparaissent dynamiquement au niveau macro à partir des interactions entre les parties au niveau micro. De tels émergents ont un caractère de nouveauté par rapport aux parties individuelles du système ».

Bien que dans de nombreux systèmes, auto-organisation et émergence apparaissent simultanément, les deux notions ne sont pourtant pas synonymes. On peut d'ailleurs trouver des systèmes avec des propriétés émergentes mais sans auto-organisation et vice versa. La pression d'un gaz est typiquement une propriété émergente liée aux interactions entre les particules qui composent le gaz mais sans qu'il y ait auto-organisation. Réciproquement, un système à base d'agents peut s'organiser de manière autonome de par les interactions entre les agents, sans nécessairement émergence de nouvelles propriétés globales. Dans un cas comme dans l'autre, l'apparition de nouvelles propriétés, fonctions ou structures stables et robustes est le résultat de l'interaction locale entre les entités individuelles du système, et entre les entités et leur environnement.

Positionnement

Même si l'on ne cherche pas à définir de manière définitive ce que recouvre le terme d'émergence, il faut néanmoins le circonscrire de manière un peu précise si l'on veut pouvoir observer, mesurer, caractériser de tels phénomènes. La première difficulté est qu'il s'agit d'un terme général, englobant des phénomènes très différents les uns des autres (Dessalles et al. 2007; 2008). Par ailleurs, les phénomènes émergents sont souvent définis relativement à un observateur externe qui qualifie ces phénomènes d'« émergents » (Bonabeau et al. 1995a;b, Bonabeau et Dessalles 1997). Dans certains cas, « émergent » est même synonyme de « surprenant » (Ronald et al. 1999). Pire, dans son acception la plus forte (Bedau 1997, Chalmers 2006), l'émergence est parfois considérée comme quelque chose de mystérieux, de magique ou de mystique puisque le phénomène global ne peut être déduit de l'activité locale des entités composant le système. De ce fait, certains auteurs remettent en question la possibilité de simuler l'émergence en utilisant des machines Turing-équivalentes et suggère l'utilisation d'outils alternatifs tels que les ordinateurs analogiques (Boschetti et Gray 2007). La conséquence de ce différents constats est le nombre relativement réduit, jusqu'à récemment, de travaux consacrés à la question de la détection, par des moyens informatisés, de l'émergence dans les systèmes complexes simulés.

Un certain nombre de travaux se positionnent assez nettement du côté de la physique ou de la théorie de l'information en proposant d'utiliser différentes mesures globales de la complexité plus ou moins liées à la notion d'entropie (voir par exemple (Bonabeau et al. 1995b, Langton 1990, Standish 2001, Boschetti et al. 2005, Prokopenko et al. 2009). Ces mesures ont cependant des interprétations différentes selon les domaines (physique, économie, science de l'information, sciences sociales) et il est de

ce fait difficile de les utiliser comme des mesures universelles d'organisation (ou de désorganisation). Par ailleurs, ce sont des mesures globales qui ne peuvent, dans le meilleur des cas, que constituer des indicateurs qu'il y a émergence ou non, mais pas de caractériser *comment* cette émergence à lieu. Enfin, cela implique parfois de reformuler le modèle en utilisant un formalisme particulier (Yamins 2005a;b) ce qui manque de généralité et complique l'utilisation de telles méthodes.

Bien qu'ils constituent des contributions intéressantes à la compréhension du concept d'émergence, les travaux théoriques tels que ceux de (Yamins 2005a) ou (Kubík 2003) ne sont plus aussi pertinents quand il s'agit d'analyser la dynamique de systèmes complexes simulés tels que les simulations à base d'agents. A contrario, on peut trouver dans le domaine de la simulation à base d'agents des exemples de travaux préliminaires mais associés à des domaines d'application spécifiques (par exemple (Servat et al. 1998b;a) pour la détection de structures hydrologiques émergentes) ou dédiés à des simulateurs et phénomènes émergents spécifiques (par exemple (Marcenac et al. 1998, Beurier et al. 2002)). Mais si l'on considère l'organisation comme le résultat des interactions entre entités de bas niveau, on peut penser à étudier la construction des organisations par l'étude de la dynamique des réseaux d'interaction sous-jacents. Les sciences sociales ont de ce point de vue une longue tradition d'étude des communautés humaines à partir de ces réseaux (Flake et al. 2002, Brdiczka et al. 2005, Dorat et al. 2007, Brdiczka et al. 2009, Panzarasa et al. 2009). Cela permet la détection de l'émergence de groupes à partir de la densité de connexions entre les individus. L'idée a été utilisée pour permettre la parallélisation de simulations à base d'agents (Bertelle et al. 2007, Dutot et al. 2007). Cette approche utilise cependant une vision restrictive de la notion d'interaction entre agents. En complément, certains ont développés des frameworks d'interaction plus riches pour analyser les comportements émergents avec la notion d'*événements complexes*, correspondant à la combinaison d'évènements reliés entre eux dans l'espace et/ou le temps (Chen et al. 2010).

Démarche

Puisque les structures à un certain niveau peuvent être considérées comme le produit émergent des interactions locales entre entités du niveau inférieur d'une part, des contraintes exercées par les entités du niveau supérieur d'autre part, il apparaît naturel de penser que ces notions d'*interaction* et de *contraintes* doivent être placées au centre de notre approche. La contrainte que l'on s'impose, pour rester aussi générique que possible, est cependant de ne pas avoir accès au code de la simulation. Le comportement des entités du modèle est donc a priori inconnu, de même que la manière dont les agents interagissent les uns avec les autres ou se contraignent mutuellement. On a choisi d'abstraire ces notions d'interaction et de contrainte par une notion plus générale d'*influence*, correspondant au fait que le comportement d'un agent est modifié par la présence d'un autre agent, dans un certain état ou à une certaine position par rapport à lui. Puisqu'on ne sait pas explicitement quand une interaction se produit entre deux agents, on s'appuie sur la détection d'*indices d'influence* ou *signes d'interaction* (Moncion et al. 2010), comme le fait par exemple que

deux agents se situent à une distance inférieure à un seuil choisi. Si la distance est inférieure à leur seuil de perception, les deux agents peuvent alors potentiellement interagir l'un avec l'autre. De même que dans (Chen et al. 2010), il est possible de construire des indices d'influence arbitrairement complexe afin de repérer, de manière ciblée, certains types d'interaction.

Du point de vue technique, la méthode suppose que la plateforme de simulation exporte un ensemble de données permettant de connaître l'état du monde simulé à chaque instant et que l'on se base ainsi sur l'observation de ces données pour détecter des *indices d'influence* se produisant dans la simulation. L'ensemble de ces influences constitue un réseau dense et dynamique d'interrelations qui évolue au cours du temps en même temps que le système simulé lui-même. L'hypothèse de base est que la topologie de ce réseau constitue la signature des processus qui structurent le système dynamiquement. En analysant la topologie du réseau d'influence, il doit alors être possible de détecter l'émergence de structures et de les caractériser.

Du point de vue le plus général, la proposition est de s'appuyer sur :

- *une définition d'indices d'influence large, riche et extensible* : au niveau le plus simple, on considérera qu'il y a un indice d'influence si deux agents sont proches ou qu'ils se déplacent dans la même direction, ou avec la même vitesse, ou qu'ils sont dans le même état, etc. ; on peut également construire des indices d'influence plus élaborés par la composition d'indices simples avec l'introduction de connecteurs logiques et temporels (permettant par exemple d'exprimer qu'un agent est passé à un endroit où un autre agent était passé cinq pas de temps plus tôt ;
- *l'utilisation de graphes dynamiques pour représenter les réseaux d'influence* : dans sa formulation la plus simple, le réseau d'influence est un graphe dans lequel les nœuds correspondent aux agents de la simulation et les arêtes aux interrelations entre agents, pris deux à deux. Cette relation pouvant être associée à différents indices d'influence, les arêtes sont étiquetées avec l'indice correspondant. Il s'agit donc d'un *multigraphe étiqueté*, avec potentiellement plusieurs arêtes étiquetées entre chaque paire de nœud ; enfin, pour prendre en compte l'évolution dynamique du graphe au cours du temps, nous ajoutons des poids sur les arêtes qui caractérisent la force de la relation entre deux agents (le poids augmente quand l'influence perdure, il diminue quand elle s'interrompt). Il s'agit donc finalement d'un *multigraphe étiqueté et pondéré* ;
- *l'utilisation d'outils des réseaux complexes et de la théorie de l'information pour caractériser la complexité du réseau* : pour chaque indice d'influence, on peut calculer la somme des poids des arêtes et le degré moyen des nœuds, qui marquent la structuration plus ou moins forte du système, la *global efficiency*, qui mesure la connectivité du graphe dans son ensemble et la *local efficiency*, pour mesurer la présence de communautés dans le graphe ;
- *l'utilisation d'outils de la théorie des graphes pour détecter et analyser l'émergence de groupes dans les simulations* : les sous-graphes connexes

dont tous les agents ont un *degré* supérieur au *degré moyen* du graphe sont considéré comme des groupes.

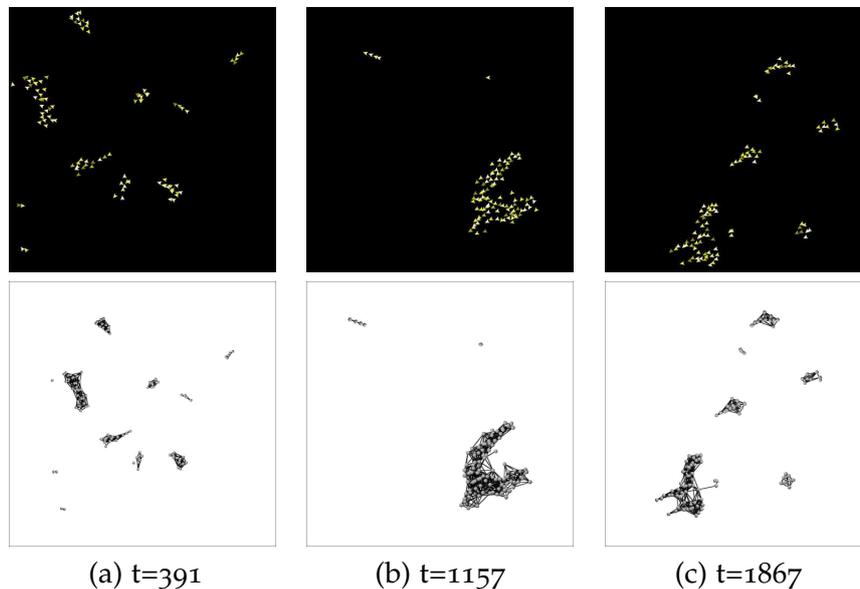


FIGURE 3.6 – Images d'une simulation de flocking et réseaux d'influence correspondants à différents pas de temps

Résultats

Pur illustrer l'approche, la figure 3.6 montre différentes étapes de l'évolution d'une simulation de vol en nuée, selon le modèle bien connu de (Reynolds 1987) avec, pour chaque situation figurée, les groupes d'agents détectés. On considère dans ce cas qu'il y a signe d'influence si deux agents sont à la fois proches et évoluant dans une direction voisine. Les agents commencent par s'agréger en petits groupes (a), qui ont eux-même commencé à adopter des orientations voisines; un groupe unique s'est alors formé (b); plusieurs groupes plus petits se sont finalement formés, évoluant selon des directions similaires. On voit sur la figure que le réseau d'influence traduit de manière fidèle ce scénario en faisant apparaître les groupes formés.

La figure 3.7 montre quant à elle l'évolution de la *global efficiency*. L'augmentation de cette propriété est le signe que les agents de la simulation sont de plus en plus connectés les uns avec les autres vis-à-vis de l'indice d'influence choisi, à savoir être proche et se déplacer dans la même direction. Le maximum est atteint lorsque tous les agents sont agrégés en un groupe unique. La valeur cependant reste relativement basse (toujours inférieure à 0.4, à comparer à la *global efficiency* d'un réseau aléatoire qui est de 0.28), ce qui signifie que chaque agent n'est pas connecté avec tous les autres agents mais seulement avec ceux qui lui sont les plus proches. On peut l'analyser a posteriori comme la conséquence de la règle de séparation du modèle de Reynolds qui prévoit que les agents s'écartent les uns des autres lorsqu'ils sont trop proches.

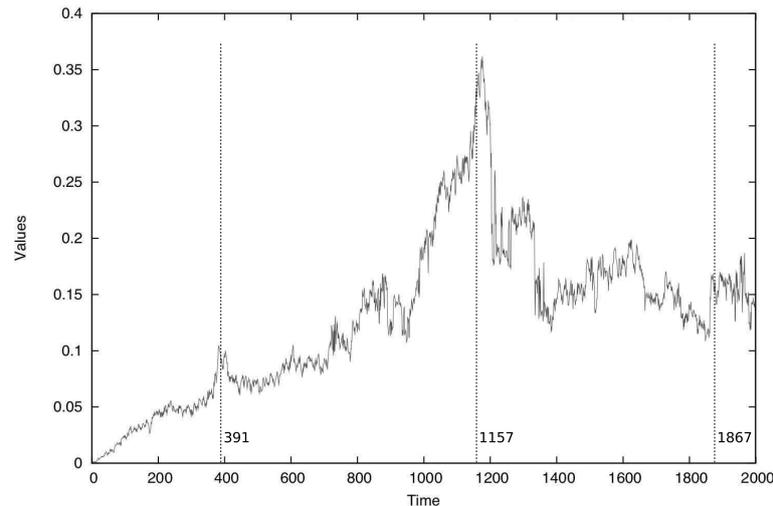


FIGURE 3.7 – Evolution de la « Global Efficiency » au cours d'une simulation de flocking

Publications

Les travaux concernant la caractérisation automatique de phénomènes émergents peuvent être retrouvés principalement dans (Moncion et al. 2010), et également dans (Moncion et al. 2007). La thèse de Thomas Moncion (Moncion 2008) regroupe l'ensemble de ces travaux ainsi que d'autres.

3.4 CONCEPTION DE MODÈLES MULTI-NIVEAUX

En cherchant à identifier et caractériser dynamiquement l'émergence de structures telles que des groupes d'agents, l'objet est de construire des outils de mesure pour le calibrage, et de favoriser l'observation et la compréhension du déroulement des simulations à base d'agents. Mais en travaillant à différents niveaux d'échelles, et en articulant le passage entre niveaux, le propos est également d'aller vers la conception de *modèles à base d'agents multi-niveaux dynamiques*. Je ne parle pas ici de modèles intégrant des objets à différents niveaux d'échelle, comme le modèle de croissance de tumeur qui intègre simultanément des objets de type *cellule* et des objets de type *molécule*. Je ne parle pas non plus de modèles spécifiant les objets modélisés à un certain niveau (cellules et molécules), et produisant des « observables » (ou *émergents* selon (De Wolf et Holvoet 2004)) reconnus à un niveau supérieur (*tumeur*) par le modélisateur. Les modèles dont je parle ici sont des modèles dans lesquels ces observables sont identifiés et caractérisés automatiquement par un système dédié extérieur au système de simulation, afin de les réifier dynamiquement, c'est-à-dire de les réintégrer en tant que nouveaux objets dans la simulation. Les exemples donnés au chapitre 2 de simulation de tumeur et de simulation de croissance urbaine n'ont pas (encore) la prétention de répondre à cette vision des choses mais ils constituent une première étape dans cette direction.

Problématique

Alors que la simulation à base d'agents s'est développée au départ sur la base d'hypothèses principalement réductionnistes, l'intérêt pour des modèles multi-niveaux s'est considérablement renforcé au cours de ces dernières années. Les travaux fondateurs du domaine sont en effet assez fortement marqués par le réductionnisme méthodologique, par laquelle on cherche à reproduire des phénomènes à un certain niveau en les réduisant en leurs composantes élémentaires et en cherchant à reconstruire le phénomène par l'interaction locale entre les entités du niveau du bas. Cette approche ascendante (*bottom-up*) a connu, et connaît encore de nombreux succès mais se heurte depuis quelques années à de nouveaux enjeux qui plaident pour des modèles qui ne soient pas ancrés à un niveau unique pour expliquer les niveaux supérieurs, mais qui puissent être d'emblée explicitement *multi-niveaux*. « Le futur de la simulation multi-agent se trouve pour moi dans cette possibilité de représentation multi-niveau, et tout indique qu'elle correspond de plus à des attentes clairement identifiées, par exemple dans le domaine de la simulation d'organisations humaines » (Drogoul 2000). Il faut noter que ces « attentes » sont en fait assez différentes selon les domaines scientifiques et selon les questions que l'on souhaite poser à son modèle. La biologie et les sciences sociales, par exemple, auront des manières sensiblement différentes d'aborder les questions de niveaux multiples.

En biologie, la problématique attaquée en modélisation est le plus souvent une problématique de *reconstruction* d'un phénomène à partir des éléments qui le constituent, dans une optique souvent prédictive. S'il y a potentiellement le besoin de prendre en compte dans le modèle des objets de différents niveaux, c'est principalement du fait de l'impossibilité pratique de modéliser l'ensemble du système au niveau le plus « bas », qu'il s'agisse du niveau des atomes, des molécules ou même des cellules. Si l'on voulait par exemple modéliser une cellule entièrement au niveau moléculaire, cela impliquerait la simulation de plus de 4.10^{13} molécules pour une cellule hépatique de rat, et encore plus de 4.10^{10} pour une bactérie comme *Eschérichia Coli*. Par ailleurs, un grand nombre des constantes de vitesse des réactions moléculaires intra-cellulaires sont inaccessibles à la mesure. En l'absence de ressources computationnelles suffisantes et de données disponibles pour construire le modèle, il apparaît donc illusoire de prétendre simuler une cellule au niveau moléculaire avec une approche entité-centrée. Les projets qui se sont développés ces dernières années visant à modéliser entièrement les mécanismes intra-cellulaires au niveau le plus fin possible (E-Cell, Virtual-Cell) s'appuient ainsi pour l'essentiel sur la modélisation déterministe par équations différentielles et sur la modélisation stochastique (Takahashi et al. 2004, Moraru et al. 2008).

En écologie ou en sciences sociales, la problématique centrale ne consiste pas à reconstruire une société, animale ou humaine, à partir des interactions entre les individus, mais plutôt de comprendre les influences réciproques entre individus d'une part, groupes et sociétés d'autre part. Considérer d'emblée des entités à différents niveaux apparaît ainsi comme quelque chose de naturel, et correspond aux ontologies manipulées dans ces domaines. De même qu'il semble naturel de prendre en compte aussi

bien les causalités ascendantes (formation de groupes par des individus) que descendantes (influences des groupes déjà formés sur le comportement des individus). Le résultat auquel on s'intéresse n'est plus alors la formation de structures de niveau supérieur mais plutôt la dynamique des processus spatio-temporels résultant de l'interaction entre agents de différents niveaux (phénomènes de ségrégation, équilibres proies-prédateurs, constitution de réseaux sociaux, etc.).

Il semble donc important de pouvoir intégrer, au sein d'un même modèle, les descriptions d'entités de différents niveaux sur les échelles spatiale et temporelle, correspondant à différents niveaux d'organisation du système. Cependant et comme le souligne Lesne dans (Lesne 2009), « il ne s'agit pas tant de prendre en considération tous les éléments et leurs relations que de considérer simultanément le niveau des éléments et ceux de leurs propriétés émergentes, et la façon dont ils sont couplés ». Pour le formuler autrement, c'est donc plus dans l'*articulation* de différents niveaux d'organisation que dans leur seule juxtaposition que se situe l'apport d'un modèle multi-niveaux. Articuler les niveaux, cela implique de les prendre en compte explicitement dans le modèle et de définir la manière dont ils sont couplés, ce qui se traduira dans un modèle à base d'agents par l'interaction entre agents/objets de niveaux différents. Cette question de l'articulation est d'actualité en simulation orientée agent, et (Treuil et al. 2008) la présentent d'ailleurs comme l'un des « chantiers » du domaine.

TODO: citer Edmonds KIDS vs KISS

Positionnement

De nombreux travaux ont abordé la question de la modélisation multi-niveaux, parmi lesquels nous avons tenté, dans (Gil Quijano et al. 2009; 2010), de dégager une typologie selon trois classes.

Multi-modèles : Il s'agit du couplage de plusieurs modèles, définis à des niveaux différents, utilisant des formalismes potentiellement divers. Les sorties des modèles de niveau supérieur servent à définir les paramètres globaux des modèles de niveau inférieur et les sorties des modèles de niveau inférieur sont considérées comme des flux d'entrée dans les modèles de niveau supérieur. On retrouve généralement ce type d'approche pour des systèmes dans lesquels il y a plusieurs ordres de grandeur entre les entités les plus grandes et les entités les plus petites. C'est le cas notamment dans la modélisation cardiaque, où l'on peut trouver, dans les cas extrêmes, la prise en compte de structures au niveau des organes, sous le contrôle de réseaux de régulation au niveau moléculaire (voir la revue de (Southern et al. 2008)). Dans ce cas, les modèles à coupler, principalement des modèles mathématiques à base d'équations différentielles, décrivent soit les différents niveaux (par exemple les cellules et les tissus), soit les différents types de physique impliqués (activités électrique et mécanique, mouvement de fluides). De même dans la simulation du cancer, on peut trouver des modèles qui associent des modèles discrets à base d'agents pour les cellules et des équations aux dérivées partielles pour rendre compte des concentrations moléculaires dans le micro-environnement et

des flux sanguins et lymphatiques (Guo et al. 2008). D'autres études y ajoutent des automates booléens pour modéliser les réseaux de régulation internes aux cellules, déterminant ainsi la progression du cycle cellulaire (Jiang et al. 2005, Zhang et al. 2007). D'autres enfin associent des équations aux dérivées partielles à différents niveaux pour décrire la dynamique de la croissance spatiale de la tumeur et la diffusion de certaines protéines (Ribba et al. 2006). On peut donc avoir selon les cas des modèles indépendants s'exécutant de manière alternée ou bien des modèles imbriqués, un modèle pouvant être encapsulé dans une entité d'un autre modèle.

Formalismes multi-niveaux : une approche alternative réside dans le développement de formalismes permettant de décrire les systèmes complexes à différents niveaux. Les *L-systèmes* (Prusinkiewicz et Lindenmayer 1990) et leurs dérivés (Godin et Caraglio 1998, Giavitto et Michel 2001) sont des exemples de tels formalismes, basés sur la description de structures topologiques grâce à une grammaire, et à leur transformation par des règles de réécriture. De même le formalisme agent est-il par nature bien adapté à la description multi-niveaux des systèmes complexes : la notion d'agent n'impose pas de niveau de description particulier, des agents de différents niveaux peuvent être mélangés au sein d'un même modèle, et l'on peut décrire des systèmes à plusieurs niveaux par la décomposition récursive d'agents en groupes d'agents. La plateforme de simulation SWARM (Minnar et al. 1996) est par exemple basée sur la notion de groupes d'agents (des *swarms*), chaque groupe ayant son propre processus de contrôle et d'ordonnancement, et chaque agent d'un groupe étant lui-même potentiellement considéré récursivement comme un groupe en tant que tel. On a donc la possibilité d'avoir cohabitation et interaction, au sein d'un même modèle, d'agents situés à des niveaux différents le long des échelles spatiale ou temporelle. On peut l'obtenir par spécification statique des entités simulées (par exemple des personnes qui interagissent avec des quartiers dans le modèle Accessim (Delâge et al. 2008)). On peut l'obtenir également par spécification dynamique des entités simulées : implémentation de mécanismes de type « loupe dynamique » qui permettent d'augmenter le degré de résolution spatiale sur des zones critiques (par exemple le modèle fractal de l'environnement proposé par (Marilleau et al. 2008)).

Modèles multi-niveaux à réification dynamique : il s'agit de modèles qui produisent des agents de niveau supérieur par « observation » automatique de la simulation, caractérisation de structures de plus haut niveau et réification de ces structures sous forme d'objets. On peut isoler le cas où les agents des deux niveaux n'interagissent pas directement les uns avec les autres (par exemple dans le modèle simulBogota (Gil-Quijano et al. 2007)) car les entités des deux niveaux ne sont pas dans le même espace de modélisation. On peut isoler par ailleurs le cas où les agents des deux niveaux peuvent interagir entre eux et avec les agents de l'autre niveau : les entités des deux niveaux sont dans le même espace de modélisation (par exemple le projet RIVAGE (Servat 2000), le projet EPITHELHOME (Smallwood et Holcombe 2006) ou encore (Gaud et al. 2008) qui se base sur des approches hiérarchiques de type holoniques). Cette approche, sans doute la plus riche, entraîne cependant une plus grande complexité puis-

qu'elle nécessite de pouvoir à la fois détecter l'apparition d'une structure émergente, caractériser sa dynamique et ses interactions avec les autres agents, vérifier que la simulation reste valide, et enfin vérifier les conditions de maintien de la structure émergente. Il s'agit ainsi de contrôler de manière dynamique aussi bien la réification de structures émergentes à partir d'agents individuels, que leur disparition lorsque les conditions de maintien ne sont plus vérifiées.

Démarche

La démarche adoptée dépend alors du domaine et de l'existant au moment de démarrer le travail de modélisation. Pour guider le choix et la conception du modèle, on peut commencer par répondre aux questions suivantes :

1. *Spécification des niveaux* : quels sont les différents niveaux identifiés, quels sont les types d'objets et/ou d'agents définis à chacun de ces niveaux, et comment ces types sont-ils définis (sont-ils spécifiés *a priori* ou bien sont-ils découverts de manière dynamique ?) ;
2. *Instanciation des objets* : comment l'instanciation des objets et/ou agents est-elle effectuée (celle-ci s'effectue-t-elle de manière statique en créant explicitement les agents du modèle, ou bien ceux-ci sont-ils créés de manière dynamique pendant la simulation en fonction du contexte ?) ;
3. *Couplage entre les niveaux* : de quelle manière les différents niveaux sont-ils couplés (comment interagissent les agents de niveaux différents ?).

Lorsque des modèles préexistent, et qu'ils ont reçu une certaine forme de validation, comme c'est par exemple le cas dans le projet SIMPOP, il semble assez naturel de chercher à préserver l'existant et d'ajouter de nouvelles composantes de manière modulaire. Un nouveau modèle peut ainsi être développé de manière « indépendante » à un niveau différent des modèles existants (SIMPOP_{NANO}) ou prenant en charge des aspects complémentaires. Sur ce dernier point, on pourrait ainsi imaginer développer un modèle dédié à l'évolution de la trame viaire d'une ville, indépendamment de SIMPOP_{NANO} qui prend en charge la répartition des richesses des différentes fonctions entre les quartiers. Le point délicat réside alors dans l'articulation, le couplage, entre ces modèles développés indépendamment les uns des autres. Que ce soit pour le couplage entre SIMPOP₂ et SIMPOP_{NANO} au sein de SIMPOP₃ ou entre SIMPOP_{NANO} et ce modèle hypothétique de développement de trame viaire, il s'agit de « mettre en phase » les deux modèles à coupler de manière à ce que le modèle résultant du couplage soit cohérent. Cette mise en phase passe en particulier par la définition d'objets communs entre les modèles à coupler et de règles concernant l'accès à ces objets et à leur mise à jour. Par ailleurs, si les modèles sont à des niveaux différents du point de vue spatial, il est fréquent que les échelles de temps caractéristiques soient également à des niveaux différents. La mise en phase passe alors également par un calage de l'ordonnement des simulations correspondantes.

Dans SIMPOP2 le niveau spatial de spécification du modèle, celui où la connaissance géographique est injectée dans les agents et comportements, est celui des villes : les villes sont des entités indivisibles, ce sont les agents du modèle (niveau micro). Le niveau système de villes constitue le niveau émergent (niveau macro). SIMPOP NANO travaille quant à lui au niveau inférieur : le niveau spatial de spécification est celui des fonctions et des quartiers (niveau micro), dans lesquels doivent se localiser *les mêmes fonctions urbaines* acquises par la ville au niveau système. Le niveau ville constitue le niveau émergent (niveau macro). Il ne s'agit donc pas de la « même » ville que celle de SIMPOP2 : celle de SIMPOP NANO est une entité qui n'existe que dynamiquement, à travers une superposition de mesures qui permettent au géographe de décider si la structure émergente de son modèle ressemble ou non à une ville. Pour SIMPOP3 nous avons donc été confrontés au besoin de réconcilier ces deux représentations de la ville, et de construire un pont entre la ville spécifiée au niveau micro de SIMPOP2 et celle, émergente, au niveau macro de SIMPOP NANO. Ce besoin est illustré par la figure 3.8.

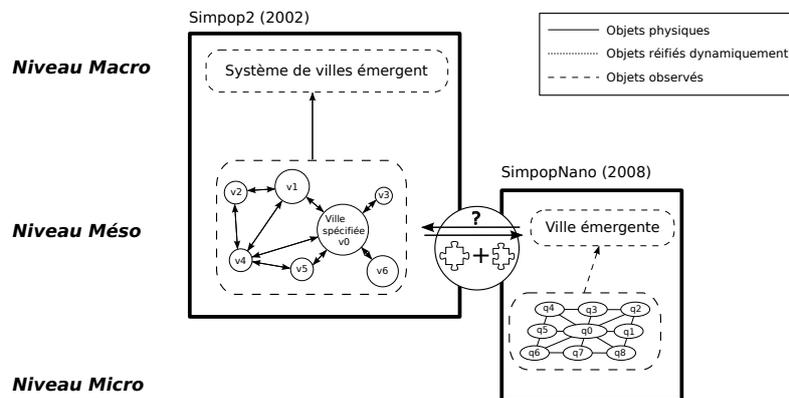


FIGURE 3.8 – SIMPOP3 : Comment articuler l'agent ville spécifié de SIMPOP2 avec la ville émergente de SIMPOP NANO ?

Pour réaliser cette articulation entre les deux modèles, nous avons choisi d'identifier une description qui leur soit commune, qui représente à la fois un effet de la dynamique du système des villes sur la ville, et qui puisse exprimer une dynamique interne à la ville susceptible d'avoir des effets en retour sur le système. La notion de *fonction urbaine* a donc été instanciée dans le programme en agent « inter-niveaux ». La fonction urbaine est à l'origine une notion définie par les géographes pour qualifier le rôle spécifique joué par une ville au sein du système, et qui trouve donc sa pertinence au niveau du système de villes. Pour réaliser le couplage, la notion a été infléchie et l'hypothèse a été faite qu'elle pouvait être utilisée pour qualifier les grands types d'activités en interaction à l'intérieur de la ville au cours de son évolution. Ce choix se justifie par la période historique abordée par le modèle (1800-2000). C'est en fait cette extension d'un concept, du niveau inter-urbain au niveau intra-urbain, qui permet d'utiliser la *fonction urbaine* comme un agent « tampon » qui permet de faire le lien entre les règles des deux modèles, et de réaliser ce couplage.

Dans le travail de modélisation de tumeur cancéreuse, l'approche est nécessairement un peu différente puisqu'il a été développé *ab initio*. Dans

ce modèle coexistent des objets de tailles très différentes, des cellules d'une part, des molécules d'autre part. Les niveaux correspondent dans ce cas (voir figure 3.9) à ces deux types d'objets, lesquels sont définis *a priori*. L'instanciation s'effectue en créant une cellule initiale, qui elle-même crée d'autres cellules par divisions successives, et produit et externalise des molécules. Les niveaux cellulaire et moléculaire sont couplés du fait de l'activité des cellules : les cellules produisent et internalisent des molécules de PAI-1. L'ensemble produit par la simulation, à un niveau d'organisation supérieur, un amas de cellules que l'on observe et que l'on désigne sous le nom de tumeur. Il n'y a pas jusque là de passage de niveau mais seulement l'interaction, dans un environnement commun, entre objets de niveaux différents sur l'échelle spatiale. Le niveau de la tumeur est quant à lui seulement observé et n'a aucun rôle en tant que tel dans la simulation.

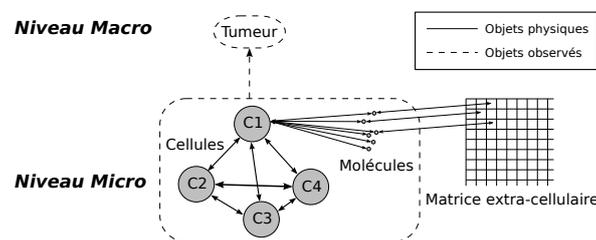


FIGURE 3.9 – Modélisation d'une tumeur à partir d'entités cellules et molécules

A contrario, lorsque le modèle agrégé est introduit (voir figure 3.10), on identifie en cours de simulation une entité de niveau intermédiaire entre le niveau des cellules et le niveau de la tumeur qui est réifiée en tant que telle. Il y a donc l'introduction d'un niveau supplémentaire de modélisation, celui d'un tissu multicellulaire correspondant au coeur de la tumeur. Ce type d'objet est spécifié *a priori* : on sait de manière certaine que la simulation du modèle va conduire au développement d'une tumeur et l'on peut donc anticiper l'apparition de cet objet. Son instanciation en revanche dépendra du moment où un tel type d'objet pourra être observé dans la simulation. Concernant le couplage avec les cellules et les molécules, il s'effectue différemment selon que ces dernières sont internes ou externes au modèle agrégé. Le couplage avec les cellules et molécules internes est réalisé grâce à un système d'équations différentielles très simples, décrivant l'évolution des quantités de cellules respectivement nécrosées et quiescentes, l'évolution de la quantité de molécules à l'intérieur du modèle, ou encore la quantité de molécules externalisée. Le couplage avec les cellules et molécules externes est réalisé en décrivant les conditions dans lesquelles ces dernières doivent être intégrées au modèle agrégé, et les règles liées à l'externalisation de molécules.

Résultats

Parler de résultats ici, cela revient à tenter d'explicitier ce qu'a apporté l'introduction d'un point de vue multi-niveaux dans la modélisation de la croissance de tumeurs et de villes. Concernant la modélisation de tumeurs, le premier gain lié à l'introduction d'un modèle agrégé pour représenter le coeur de la tumeur s'exprime sous la forme d'une forte économie des ressources de calcul nécessaires. Alors que le nombre de cellules et de

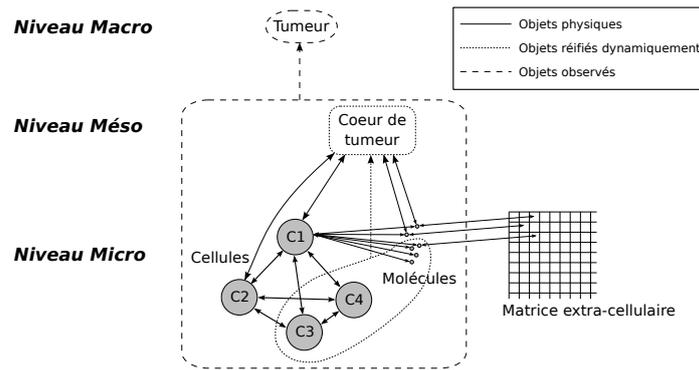


FIGURE 3.10 – Introduction d'un modèle agrégé pour le coeur de la tumeur

molécules simulées augmente de manière exponentielle, l'introduction du modèle agrégé permet en effet de linéariser l'augmentation des ressources nécessaires pour simuler le système (voir la figure 3.11). Mais le gain de temps de calcul n'a d'intérêt que parce qu'il permet d'améliorer le calibrage du modèle, d'augmenter la taille des tumeurs simulées, ou encore d'augmenter la finesse de modélisation dans les zones intéressantes, c'est-à-dire à l'interface entre la tumeur et la milieu micro-environnemental.

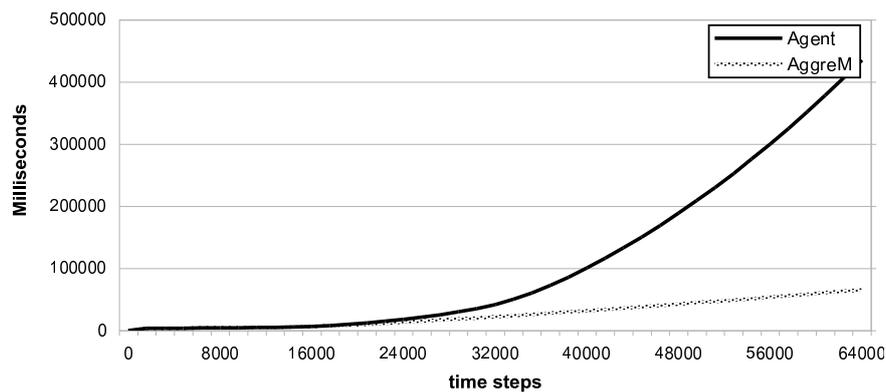


FIGURE 3.11 – Comparaison des temps de calcul nécessaires pour simuler des paquets de 1600 pas de temps, avec un modèle agent simple (Agent) ou avec introduction d'un modèle agrégé (AggreM)

Concernant la modélisation de la croissance des villes, il est encore trop tôt pour parler des résultats de simulation de SIMPOP3 mais l'apport essentiel d'une approche multi-niveaux dans ce cadre est de permettre de recycler les modèles déjà existants en construisant des modèles plus larges par une approche modulaire.

Publications

On pourra retrouver dans (Gil Quijano et al. 2009; 2010), une présentation développée des problématiques attachées à la conception de modèles à base d'agents multi-niveaux. On trouvera également dans (Lepagnot et Hutzler 2009) les détails de la conception du modèle agrégé dans le cadre du modèle de croissance tumorale. On trouvera enfin une analyse comparée des ontologies en géographie et en informatique pour la modélisation multi-niveaux dans (Pumain et Louail 2009).

DISCUSSION - CONCLUSION

J'ai présenté dans ce chapitre différentes problématiques abordées en vue d'améliorer les techniques et outils de simulation à base d'agents. Beaucoup, évidemment, reste à faire et l'on peut essayer de dégager des grandes pistes pour l'avenir :

- J'ai en particulier présenté la simulation à base d'agents comme une méthode quantitative, orientée vers la simulation des systèmes modélisés. A ce titre, elle ne sait pour l'instant pas dire grand chose des états stationnaires possibles d'un système, en fonction de son état initial. Il me semble pourtant très important, dans le cadre du calibrage, de prendre en considération le fait que pour un même modèle, et un même paramétrage, l'avenir du système peut être très différent du fait d'une part de la stochasticité, d'autre part de la multistationnarité. La stochasticité inhérente à la simulation peut engendrer, en fonction de l'initialisation du générateur de nombres aléatoires, des variations qu'il faut moyenner, ce qui est déjà pris en compte dans les outils développés par B. Calvez. L'existence de plusieurs états d'équilibre conduit par ailleurs, en fonction de l'état initial du système, à des dynamiques potentiellement radicalement différentes, donc à des évaluations elles aussi très différentes de la fonction objectif définie dans le processus de calibrage.
- De manière connexe, un besoin qui apparaît aussi bien dans la modélisation du switch génétique que dans celle de la croissance de tumeurs, concerne la prise en compte d'*événements rares*. Ces événements rares correspondent, dans le premier cas, à la survenue d'un changement spontané d'état d'équilibre dont nous avons décrit les mécanismes possibles au chapitre 2, dans le second cas, à la survenue de l'échappement métastatique d'une cellule de la tumeur. Si l'on considère par exemple le switch biologique, les approches « qualitatives » de modélisation prévoient qu'un tel événement n'est pas seulement rare mais véritablement impossible. Or ce que montre mon modèle, c'est que même si l'évènement est très peu probable, la probabilité qu'il se produise quand même est non nulle. Toute la question étant de savoir quelle est cette probabilité... Cette problématique d'évènements rares est étudiée dans le domaine de la statistique et constitue un domaine en émergence en simulation, ainsi qu'en témoigne le *Rare Events Simulation Workshop* organisé fin 2010. Elle est pour l'instant étudiée principalement dans des approches de simulation stochastique de type Monte-Carlo et autres systèmes particuliers, mais on ne pourra faire l'économie de la prendre en compte en simulation à base d'agents.
- Dans un tout autre domaine, mais de manière également connexe à la problématique de caractérisation des états stationnaires du système modélisé, les géographes du laboratoire Géographie-Cités développent une démarche comparative dans laquelle ils cherchent à déterminer si un modèle générique peut à lui seul expliquer différentes formes de villes ou de systèmes de villes, modulo la sélection de paramétrages appropriés. Il s'agit pour l'instant, étant données les observations X et Y , de déterminer les paramétrages $param_X$ et

param_γ reproduisant au mieux ces observations. On pourrait être tenté d'aller plus loin, et de déterminer, dans un exercice de *géographie hypothétique*, l'ensemble des grandes *classes d'évolution* « prévues » par le modèle générique en fonction des paramétrages possibles.

- J'ai présenté la problématique de caractérisation automatique des phénomènes émergents dans une simulation agent comme un moyen d'une part d'améliorer le calcul de fonctions objectifs pour le calibrage de modèles, comme une première étape d'autre part vers la conception de modèles multi-niveaux dans lesquels l'identification, la caractérisation et la réification de structures « émergentes » pourrait s'effectuer de manière dynamique. De tels couplages restent encore à réaliser et constituent un vaste domaine d'étude pour les années à venir.

Un peu a été fait... énormément reste donc à faire. Si dans ce cadre, j'ai jusqu'à présent recherché au maximum l'automatisation des méthodes proposées, il me semble probable, sinon inévitable, qu'il faudra dans l'avenir associer plus étroitement le modélisateur aux différents processus que nous venons d'identifier pour l'étude des simulations agents. Il semble en effet à peu près certain que tout ne pourra pas être fait de manière entièrement automatique et l'aide du modélisateur devra sans doute être sollicitée pour guider, de temps en temps, le processus automatique. Cela impliquera naturellement de développer de nouvelles problématiques liées aux interactions entre modélisateur et simulateur, donc notamment à la *visualisation* des simulations. Paradoxalement, alors même que la visualisation constituait l'une des thématiques centrales de mon travail de thèse, et que j'ai continué à travailler sur le sujet de l'interaction homme-machine (voir le chapitre suivant) et à développer des projets de création artistique avec Bernard Gortais (chapitre 1), j'ai un peu négligé la visualisation au cours de ces dix dernières années (hormis un travail de TER de M1 encadré sur le sujet). Le moment est peut-être venu, sur la base du travail effectué dans le domaine des IHMs, de réintégrer l'humain dans le cycle de modélisation et de simulation.

L'INTERACTION HOMME-MACHINE

4

SOMMAIRE

4.1	LE PROJET MACHINE	71
4.2	PROROTYPAGE DE SYSTÈMES RÉACTIFS ET ADAPTATIFS	75
4.3	CONSTRUCTION ET RÉGULATION DE TRAITEMENTS DE DONNÉES	80
4.4	RAISONNEMENT PAR ANALOGIE ET ANTICIPATION DU CONTEXTE	85
4.5	INTERACTION HOMME-ROBOT FONDÉE SUR LES ÉMOTIONS	89
	DISCUSSION - CONCLUSION	93

MA recherche dans le domaine des interfaces homme-machine a d'abord été guidée par des projets de création artistique (présentés au chapitre 1) avant de s'autonomiser dans le cadre du projet MACHINE. Même si ce projet est lui-même issu de la réflexion impulsée par Bernard Gortais dans le cadre d'un projet de scénographie interactive entre un danseur et un système numérique de captation, il s'est rapidement autonomisé comme projet de recherche à part entière, au sein duquel, occasionnellement, peuvent se développer des projets de création (voir par exemple le projet *Diversité* 1.2). Je vais commencer par introduire le contexte global de recherche sur les interactions homme-machine, ainsi que le projet MACHINE 4.1. J'aborderai ensuite le travail réalisé dans le cadre du projet en commençant par les aspects logiciels avec les architectures adaptatives de traitement de données 4.2 et 4.3, puis en abordant l'observation de l'utilisateur et l'anticipation du contexte d'interaction 4.4, avant de développer la prise en compte des émotions 4.5.

4.1 LE PROJET MACHINE

L'informatique ambiante

It is invisible, everywhere computing that does not live on a personal device of any sort, but is in the woodwork everywhere.

A less-traveled path I call the "invisible"; its highest ideal is to make a computer so imbedded, so fitting, so natural, that we use it without even thinking about it.

Mark Weiser

La société du numérique, dans laquelle nous sommes entrés de plain-pied, a souvent été associée à la notion d'immatériel et de virtuel. Immatérialité de l'information, virtualité des objets manipulés. Le paradoxe actuel est que l'ordinateur, support jusque-là de la représentation et de la transformation de l'information numérique, est en passe à la fois de disparaître en tant que tel, et de se réincarner sous une multitude de formes nouvelles. Il est en passe de disparaître de notre champ de perception, et dans le même temps de prendre corps dans une multitude d'objets du quotidien. Des objets numériques par nature, mais pas seulement.

Les habits nouveaux de l'informatique incluent naturellement tous les gadgets électroniques communicants à la mode, tels que téléphones portables, assistants personnels, baladeurs numériques, tablettes tactiles, livres électroniques ou GPS. Ils comprennent également tous les systèmes informatisés et automatisés qui peuplent, ou peupleront bientôt, nos maisons, et que l'on regroupe globalement sous l'appellation de *domotique*, visant à apporter aux habitants des éléments de confort, d'assistance, de sécurité, de gestion d'énergie ou encore de communication. Ils évoluent maintenant, avec notamment la généralisation des tags RFID¹, des réseaux de communication sans fils et des techniques de géolocalisation, vers la fusion entre objets du quotidien (livres, vêtements, objets de décoration, clés, etc.) et fonctionnalités, ou services, numériques. Le lapin *Nabaztag*² en est une des illustrations actuellement les plus « parlantes ». Allant encore plus loin dans l'intégration entre réalité physique et artefacts numériques, les réseaux de capteurs et autres poussières intelligentes proposent un maillage fin de notre environnement avec de minuscules capteurs et effecteurs, amenés à fonctionner de manière à la fois autonome et coordonnée, à la manière du banc de poisson conduit par Pilotin (voir préface).

Une grande partie de la recherche s'est focalisée, dans un premier temps, sur les moyens techniques de mise en communication de ces objets. Comment construire le support physique de cette communication (problématique réseau), comment faire dialoguer les applications fonctionnant sur ces réseaux (problématique de systèmes distribués), comment définir la sémantique des communications de manière à ce que les entités se comprennent et puissent mettre en place des protocoles et stratégies de coordination et de coopération (problématique agent). Sont apparues ensuite les problématiques liées aux propriétés « self-* » des logiciels ou systèmes d'information complexes, en réponse aux besoins de passage à l'échelle,

1. Radio-Frequency IDentification ou Identification par Radio-Fréquence

2. <http://www.nabaztag.com/fr/index.html>

de décentralisation, d'hétérogénéité, de mobilité, de dynamique, de tolérance aux pannes : auto-configuration, auto-réparation, auto-optimisation, auto-protection. En revanche, la question de l'utilisabilité de ces nouveaux types de dispositifs numériques diffus, et les potentialités d'interaction nouvelles qu'ils offrent sont longtemps restés marginales.

Informatique ambiante et art numérique

Or, with more fantasy, we can imagine a future of the visual arts populated with patronizing pieces of sculpture and caustic canvases that recognize the viewer to be male or female, rich or poor, bewildered or blasé, you or me. In this fiction, that artist runs a kernel for cuddly art forms that get to know their future owners, who in turn get to know and love them.

N. Negroponte (Negroponte 1979)

Les artistes de leur côté s'en sont emparés, de même qu'ils se sont emparés, tout au long de l'histoire, de chaque nouvelle avancée technique et technologique pour en détourner l'usage. De manière humoristique et subversive, c'est souvent une vision métaphorique et décalée de l'homme technologique qui est présentée au travers d'installations numériques interactives (voir par exemple (Forest 2004, Nechvatal 2009, Sommerer et al. 2008)). Pourquoi dès lors ne pas considérer que le champ de la création artistique interactive puisse être vu, et utilisé, comme une mise en scène métaphorique des nouveaux usages en cours d'émergence dans la société. Pourquoi corrélativement ne pas considérer qu'il puisse alors constituer un contexte privilégié pour étudier les développements conceptuels et techniques nécessités par ces nouveaux usages. C'est le point de vue que j'ai développé au cours de mes recherches en proposant de transposer, dans le champ artistique, l'étude de problématiques de recherche de nature informatique.

La création artistique, comme nous avons pu le démontrer avec le *Jardin des Hasards* et *Mutations*, ne fait pas qu'utiliser les techniques informatiques les plus avancées, elle participe également à leur développement. L'art a posé en effet, et avec une grande exigence, quelques uns des problèmes fondateurs de l'intelligence artificielle comme ceux du raisonnement et de la créativité (Gips et Stiny 1975), en même temps qu'un grand nombre de questions au cœur des interfaces homme-machine. En abordant l'interactivité, certaines créations comme le *Senster* d'Edward Ihnatowicz (Leavitt 1976), une espèce de girafe robotisée dont la tête réagissait aux bruits et aux mouvements des spectateurs qui l'entouraient, posaient même, il y a quelques dizaines d'années, la question de l'intelligence située, bien avant que celle-ci ne devienne un réel sujet d'étude (voir par exemple les actes de la conférence Intelligence Artificielle Située (Drogoul et Meyer 1999)) suite au constat d'échec de l'approche complètement désincarnée de l'IA. On pourra trouver dans (Camurri et al. 2003, Paradiso 2003, Sparacino et al. 2000) des travaux plus récents sur la scénographie interactive.

Le projet *J'ai dansé avec Machine*

Dans la lignée du *Jardin des Hasards* et de *Mutations*, c'est la même démarche qui a prévalu dans la définition du projet *J'ai dansé avec MACHINE* : imaginer un projet de création artistique qui, outre sa qualité artistique intrinsèque, fournisse un cadre de recherche et d'expérimentation le plus large et le plus riche possible, en phase avec les problématiques actuelles, dans le domaine du multi-agent mais pas seulement. Du point de vue artistique, l'objectif est d'établir un dialogue entre un danseur humain et un système informatique capable d'analyser la performance du danseur grâce à différents capteurs et capable d'y répondre grâce à la combinaison de différentes modalités, visuelle, sonore, odorante, haptique, etc. Du point de vue informatique, la démarche adoptée consiste à considérer le « partenaire » du danseur non pas comme un système informatique unique, centralisé, et bien identifié, mais plutôt comme un environnement diffus constitué de systèmes informatiques de différentes natures que l'on peut regrouper collectivement sous le vocable « d'objets communicants ».

Capteurs, afficheurs, effecteurs, ordinateurs, tous ces objets ont en commun d'allier des capacités de traitement local plus ou moins importantes à des capacités de communication leur permettant d'échanger de l'information. Ils sont notamment au cœur du contrôle de systèmes industriels complexes (contrôle incendie de sites hospitaliers, contrôle de la sécurité de fonctionnement de centrales, etc.) et ils peuplent d'ores et déjà nos habitations et notre environnement (vêtements, appareils électroménagers, installations électriques, appareils électroniques de communication, voitures, etc.). Ils occupent ainsi une place de plus en plus importante dans notre quotidien et soulèvent de nouvelles problématiques en termes de conception, d'organisation, d'usage, d'adaptation et de déploiement (Drogoul et Servat 2001). Toutes ces différentes problématiques, fondamentales pour le développement de *l'informatique diffuse*, se trouvent ici concentrées dans le cadre du projet de création artistique *J'ai dansé avec MACHINE*, contexte qui permet de développer une recherche cohérente et approfondie dans un domaine qui constitue très probablement l'un des enjeux majeurs de ces prochaines années.

Vers des *Environnements Cognitifs Ambiants*

it's time to design and build computing systems capable of running themselves, adjusting to varying circumstances, and preparing their resources to handle most efficiently the workloads we put upon them. These autonomic systems must anticipate needs and allow users to concentrate on what they want to accomplish rather than figuring how to rig the computing systems to get them there. (Horn 2001)

En considérant que le système interactif doit être enfoui et dissimulé dans un ensemble diffus d'objets communicants, nous définissons ce que nous appelons des *Environnements Cognitifs Ambiants* (ECA). L'objectif est que ces environnements deviennent sensibles aux gens qui y vivent. Il ne s'agit pas de devenir intrusifs et d'espionner les mouvements des habitants, mais d'être à l'écoute de leurs dispositions émotionnelles et de s'y adapter. Cette adaptation peut prendre la forme de la production d'am-

biances visuelles et sonores : calme quand les habitants sont calmes, ou à l'inverse calme quand quand des enfants deviennent trop excités, ou qui deviennent « énergiques » si les habitants sont très calmes alors que le système analyse qu'ils devraient normalement être plus énergiques. Mais ce n'est pas seulement l'ambiance qui pourrait ainsi être adaptée : des actions spécifiques pourraient être décidées par l'utilisation d'objets « motorisés » tels que des robots ; des affichages spécifiques pourraient être diffusés sur les murs ou sur des vêtements, pour établir un contact ou transmettre une information ; finalement, des appareils électroniques tels que téléphones portables intelligents, assistants personnels, lecteurs MP3 ou encore le lapin *Nabaztag* évoqué précédemment pourraient être utilisés pour envoyer des messages sonores ou visuels personnalisés à un habitant particulier. Au-delà que l'aspect de confort et de loisir associé à la vision artistique, une des applications directement envisageable et à laquelle je collabore dans le cadre d'une action incitative du laboratoire IBISC, est celle d'*assistance ambiante* (Colle 2007). Dans le cadre du maintien des personnes à domicile, il s'agit de proposer des services d'assistance à la personne qui pourraient alors être construits de manière dynamique en fonction des besoins, c'est-à-dire en fonction du contexte courant et en utilisant les ressources disponibles à ce moment là, pour répondre à une demande, que celle-ci soit exprimée explicitement par l'utilisateur ou inférée par le système (par exemple lorsqu'il y a suspicion de chute).

Cinq caractéristiques importantes caractérisent spécifiquement, selon moi, ces *ECAs* :

- l'interaction n'est pas sous le contrôle d'un objet ou composant unique qui coordonnerait tous les autres, mais est le résultat coordonné d'un ensemble de composants qui coopèrent pour la construction et l'exécution d'un service ;
- les personnes ne devraient avoir besoin d'aucun équipement spécifique à porter pour interagir avec un *ECA*, d'où le besoin d'exploiter les ressources disponibles dans l'environnement (capteurs, effecteurs, ressources de calcul, etc.), sur le lieu de l'interaction et au moment où elle se produit, d'où le besoin pour le système de percevoir le *contexte de fonctionnement* ;
- les personnes interagissant avec ces *ECAs* ne devraient avoir besoin d'aucune compétence technique particulière pour les faire fonctionner, d'où le besoin pour le système de percevoir le *contexte d'interaction* (ressources disponibles, personne(s) participant à l'interaction, service requis, etc.) et de s'y adapter par une (re-)configuration automatique ;
- l'interaction doit être multimodale, en utilisant les modalités d'interaction auxquelles les personnes sont habituées, d'où le besoin de langages multimodaux pour analyser et représenter la situation courante et construire la réponse du système ;
- l'interaction doit prendre en compte les émotions exprimées par les utilisateurs et le système doit être lui-même capable de produire une réponse décrite en termes émotionnels, d'où le besoin d'un modèle dynamique de représentation des émotions, celles de l'utilisateur aussi bien que celles du système.

On pourrait résumer en disant que l'interface ne doit pas être plus

visible que ne le sont les ordinateurs eux-mêmes. Si les ordinateurs disparaissent de notre champ de vision, l'interface doit elle aussi devenir aussi discrète et naturelle que possible. Pour atteindre l'objectif, un certain nombre de recherches ont été menées, que l'on peut classer dans trois grandes catégories : les architectures adaptatives de traitement de données (voir section 4.2 et 4.3), qui sont des architectures logicielles « malléables » (self-*) capables de se réorganiser ou d'adapter leur fonctionnement selon le contexte ; l'observation et la modélisation du comportement de l'utilisateur (voir section 4.4), de manière à adapter le comportement du système aux habitudes de cet utilisateur, voire d'anticiper son comportement ; enfin l'observation et la modélisation des émotions de l'utilisateur (voir section 4.5) de manière à mettre en place une interaction au niveau des émotions.

4.2 PROROTYPAGE DE SYSTÈMES RÉACTIFS ET ADAPTATIFS

Dong Yue WANG a commencé sa thèse (Wang 2005) au moment où j'ai été recruté comme maître de conférences. Un an et demi plus tard, son directeur de thèse a pris une disponibilité et j'ai repris son encadrement scientifique, en réorientant par la même occasion sa thématique de recherche vers les architectures décentralisées et adaptatives de traitement de données. Nous avons ensuite décidé, avec Hanna Klaudel, d'y associer une coloration « génie logiciel » et « méthodes formelles » en proposant une chaîne automatisée de conception et de prototypage de tels systèmes, en passant par leur simulation et la vérification de propriétés temporelles.

Problématique

Les environnements cognitifs ambiants que nous venons de décrire sont des systèmes interactifs, et de ce point de vue, ils sont donc des *systèmes réactifs* au sens où ils doivent *réagir* constamment aux sollicitations de leur « environnement » (le ou les utilisateurs donc), en se conformant à un certain nombre de contraintes temporelles. En un temps limité, le système doit donc acquérir et traiter les données et les événements caractérisant l'évolution temporelle de cet environnement, prendre les décisions appropriées et les transformer en actions. La fonctionnalité du système provient ainsi de sa capacité à présenter les bonnes sorties (correction logique) au bon moment (correction temporelle). Du fait du caractère souvent critique de ce type d'applications, les architectures logicielles et matérielles correspondantes sont spécifiées, développées, validées avec le plus grand soin et sont ensuite figées de manière à s'assurer que le système aura un comportement déterministe et prédictible.

Dans un certain nombre de cas cependant, il est pénalisant voire impossible de figer a priori l'architecture de traitement. Cela peut être pénalisant parce que les traitements les plus appropriés peuvent varier en fonction du contexte, du temps de réponse souhaité, des ressources disponibles, etc. Cela peut être impossible parce qu'un certain nombre des éléments que l'on vient de citer peuvent être inconnus au moment de la conception et que l'on souhaite alors pouvoir construire l'architecture de traitement des données au moment même où elle est nécessaire. C'est typiquement le cas des ECAs et nous nous sommes donc intéressés à des

systèmes capables d'adapter tout ou partie de leur architecture de traitement de manière dynamique, en cours de fonctionnement. Ces systèmes étant par ailleurs distribués physiquement à travers l'environnement, nous nous sommes intéressés à des systèmes capables d'assurer cette adaptation de manière décentralisée. C'est ce que nous désignerons par la suite sous le terme de « systèmes temps-réels décentralisés, réactifs et adaptatifs ».

Dans le cadre plus particulier du projet *J'ai dansé avec MACHINE*, il importe que l'interaction entre le système et le danseur soit aussi fluide que possible. La contrainte temporelle essentielle correspond ainsi au temps de réponse du système, c'est-à-dire le temps entre le moment où des données sont acquises par les capteurs et le moment où ces données provoquent une réponse au niveau des effecteurs. Ce temps de réponse doit naturellement être maintenu aussi faible que possible pour ne pas provoquer de délai désagréable entre une action du danseur et la réponse correspondante du système. Dans le même temps, l'analyse de la performance du danseur doit rester aussi précise et approfondie que possible. Ces deux contraintes sont potentiellement contradictoires puisqu'une analyse précise et approfondie nécessite évidemment un temps de traitement plus long qu'une analyse grossière et superficielle. La qualité de l'analyse peut être mesurée selon deux dimensions complémentaires, la précision d'analyse (mesure plus ou moins précise d'une caractéristique de la performance) et le niveau d'abstraction (ajout d'une étape supplémentaire de traitement pour obtenir de nouvelles mesures). Il s'agira alors d'optimiser le compromis entre respect de la correction logique et respect de la correction temporelle, en relâchant au choix l'une ou l'autre des contraintes lorsque les ressources disponibles ne permettent pas de respecter les deux simultanément. La figure 4.1 illustre les différentes possibilités de chemins de traitement en fonction des ressources disponibles et des contraintes temporelles à respecter, pour la modalité visuelle.

Positionnement

Du fait des contraintes temporelles souvent fortes à respecter, l'usage des systèmes multi-agents dans ce cadre peut sembler limité, notamment de par l'autonomie et la proactivité que l'on attribue généralement aux agents. De fait, de nombreux exemples d'utilisation des systèmes multi-agents dans un contexte temps-réel (Attoui 1997, Wolfe et al. 2000) mettent en avant davantage les aspects liés à la *distribution* des éléments du système plutôt qu'à leur *décentralisation*. Dit autrement, il s'agit de faire fonctionner ensemble des entités distribuées mais avec une architecture globale figée. En ce qui concerne par ailleurs les agents autonomes, les travaux qui s'intéressent à l'intégration de problématiques temps-réel se focalisent en priorité sur la cohabitation, au sein d'un agent unique, de modules de raisonnement (pour la planification par exemple) et de modules de contrôle temps-réel (Musliner et al. 1993, Atkins et al. 2001). La problématique essentielle consiste alors à déterminer à quel moment l'activité de raisonnement de l'agent doit être interrompue pour lui permettre de conserver un fonctionnement temps-réel. Dans le problème auquel nous nous intéressons, ce n'est pas un agent isolé qui doit fonctionner en temps-réel mais un système multi-agent qui doit se comporter globalement comme un sys-

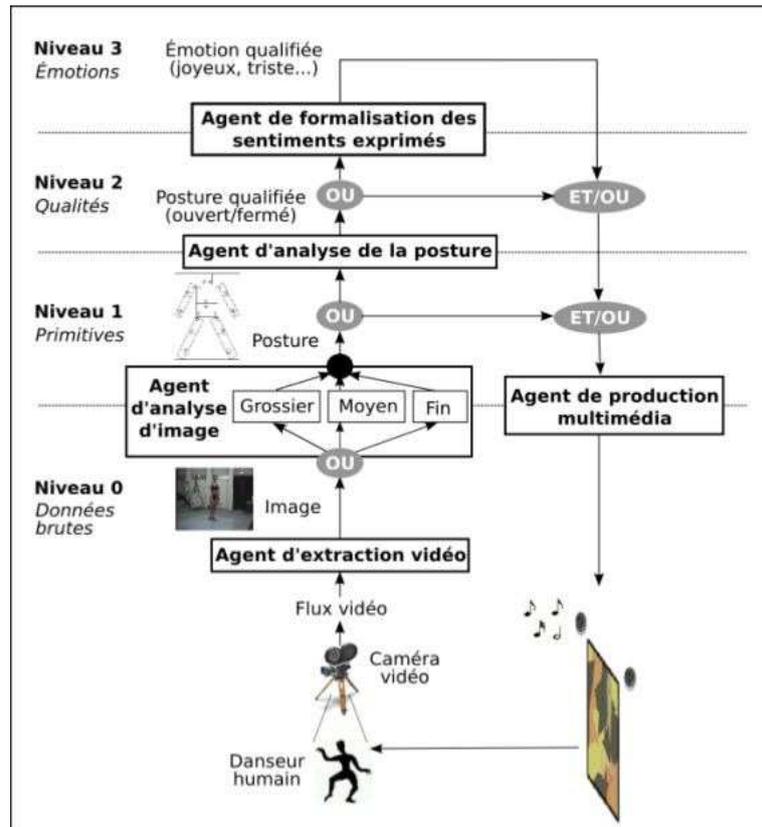


FIGURE 4.1 – Schéma simplifié des chemins de traitement des données pour la modalité visuelle dans le projet J'ai dansé avec MACHINE

tème temps-réel. Les contraintes de fonctionnement temps-réel doivent donc être gérées de manière collective et non plus individuelle. Cet aspect coopératif entre agents est resté pendant longtemps marginal même si des travaux commencent maintenant à s'y intéresser (Musliner et al. 2003, Soler et al. 2002, Marc et al. 2003).

Pour étudier ces problématiques, nous avons choisi de nous appuyer sur l'utilisation de formalismes permettant d'une part de spécifier des systèmes concurrents et temps réels et d'autre part de vérifier certaines propriétés par rapport à leur fonctionnement. Parmi ces formalismes, on trouve notamment les algèbres de processus temporisées (CCS (Milner 1983), CSP (Hoare 1989), ACP (Bergstra et Klop 1989)), les réseaux de Petri avec représentation du temps (Berthomieu et al. 2004), les logiques temporelles (CTL (Clarke et al. 1996) et LTL (Pnueli 1977)) et temporisées, ou encore les automates temporisés (Alur et Dill 1994). Ce dernier formalisme semblait présenter un certain nombre de bonnes propriétés, parmi lesquelles le fait d'être relativement simple à manipuler, tout en étant associé à des outils puissants de model-checking. L'un de ces outils est UPPAAL (Larsen et al. 1998), que Dong Yue Wang a utilisé tout au long de son travail.

Démarche

Nous considérons que le système informatique d'interaction avec le danseur est constitué d'un ensemble de processeurs, dotés de moyens de

communication et associés ou non à des capteurs (caméras vidéo, capteurs biométriques, capteurs de localisation, etc.) et/ou des effecteurs (écrans, haut-parleurs, moteurs, etc.). Sur chaque processeur peuvent s'exécuter un ou plusieurs agents, chacun spécialisé dans un certain type de traitement. Les données issues des capteurs doivent être traitées par différents agents avant de pouvoir être converties en actions au niveau des effecteurs. L'action des agents consiste à analyser, synthétiser, transformer les données qu'ils reçoivent. Les nouvelles données ainsi produites par un agent sont ensuite transmises à d'autres agents chargés de poursuivre le traitement. Lorsque l'analyse est suffisamment avancée, ou que le temps disponible est insuffisant pour poursuivre cette analyse, les données sont finalement utilisées pour générer des images, des sons ou toute autre action grâce à des effecteurs.

La démarche développée par D. Y. Wang est associée aux caractéristiques suivantes :

- *un compromis adaptatif* : l'architecture est le résultat d'un compromis entre la *qualité de l'analyse* (avec quelle précision le système analyse-t-il la performance du danseur ?) et la *qualité temporelle* (avec quelle tolérance le système respecte-t-il les contraintes temporelles ?). On peut, à partir de ces deux facteurs, construire une mesure de *qualité globale* qui servira à évaluer la performance du système selon qu'il utilise telle ou telle stratégie pour le contrôle dynamique de la chaîne de traitement des données.
- *une démarche de prototypage rapide* : l'objectif de la modélisation est alors de pouvoir tester le plus rapidement possible différentes stratégies, et de fournir les outils pour automatiser au maximum la phase d'implantation jusqu'à un prototype opérationnel. La modélisation devra aussi pouvoir servir à vérifier a priori le respect par le système de certaines propriétés (temps de réponse global, non-blocage, ordre d'exécution des traitements, etc.).
- *une démarche incrémentale* : les principes de contrôle adaptatif du système sont étudiés en commençant par les stratégies adaptatives les plus simples, et on n'envisage le passage à des architectures plus compliquées que si ces architectures simples sont incapables de donner une solution au problème posé. La phase de conception devra ainsi passer par des cycles successifs de modélisation, vérification et simulation, jusqu'à obtenir un modèle satisfaisant, susceptible d'être implanté sur une plate-forme réelle.
- *une démarche modulaire* : pour aider au prototypage rapide du système, il est important de pouvoir fournir aux concepteurs des éléments validés et dont on puisse assurer que le fonctionnement respecte certaines propriétés. Le concepteur doit pouvoir les réutiliser, en sélectionnant ceux qui présentent les bonnes propriétés et en les composant les uns avec les autres. Cela passe par la possibilité de concevoir ces automates de manière modulaire et par la possibilité d'utiliser des sortes de patrons de conception définissant de manière générique des agents ou des sous-systèmes.
- *une démarche automatisable* : De manière complémentaire aux formalismes et aux outils de modélisation (éditeurs, model-checkers, simulateurs, etc.), il est nécessaire de proposer des outils facilitant

le passage du modèle jusqu'à un prototype opérationnel, voire jusqu'au système réel. Le premier intérêt est d'accélérer le développement du système en automatisant la génération d'un squelette de l'application finale. Le deuxième est de garantir au maximum que les propriétés qui ont pu être vérifiées au niveau de la modélisation sont conservées lors de la phase d'implantation.

Résultats

Le principal résultat obtenu est une preuve de faisabilité de l'approche proposée. Un modèle d'architecture multi-agent de traitement de données a été proposé en utilisant le formalisme des automates temporisés. Dans ce modèle, les différents agents participant au traitement des données peuvent être modélisés en séparant les informations de contrôle (la gestion des états de l'agent) et le traitement des données proprement dit, ce qui permet ainsi d'obtenir la modularité recherchée. Un agent peut en effet choisir de cette manière entre plusieurs modules de traitement de différentes précisions, grâce à un contrôleur qui aiguille les données vers l'un ou l'autre (voir figure 4.2).

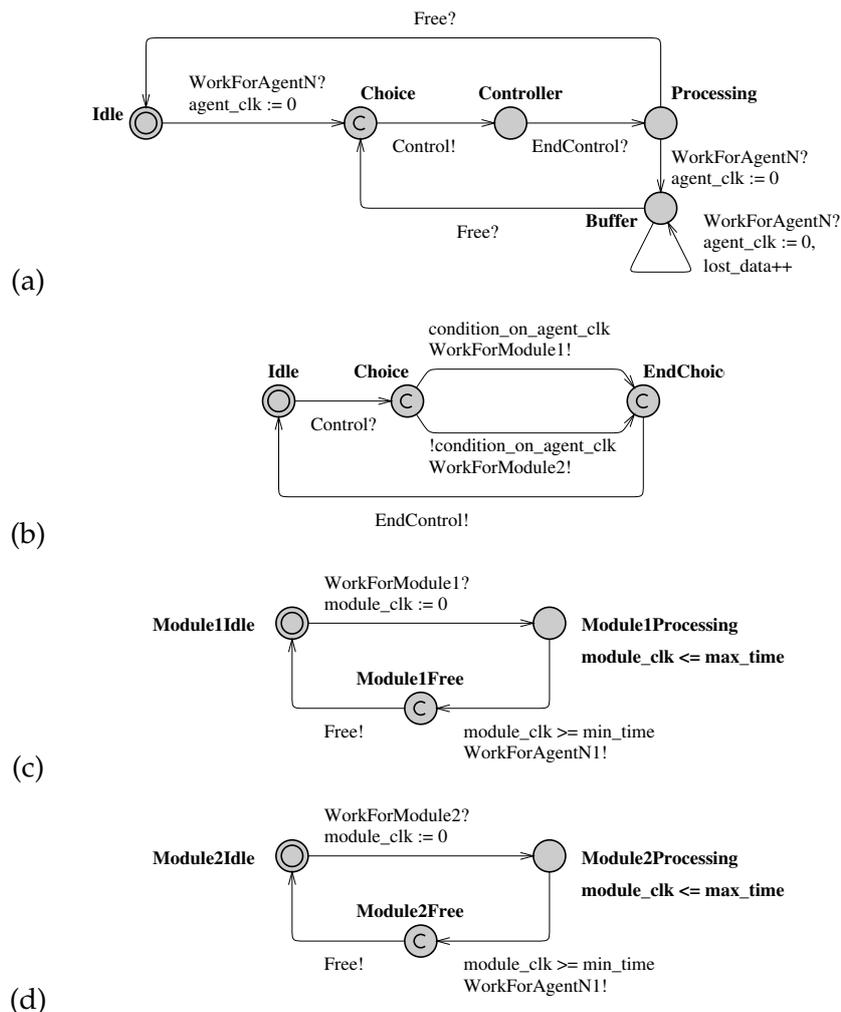


FIGURE 4.2 – Modèle d'agent composé d'un agent générique (a), d'un contrôleur (b) et de deux modules de traitement (c) et (d)

On peut vérifier sur ce modèle, grâce aux techniques de model-checking, l'absence de deadlock ou de perte de données, ou contrôler la proportion relative d'utilisation de chacun des modules de traitement. Par ailleurs, un contrôleur correspond ici à une stratégie de choix entre différents traitements possibles et on a pu étudier, par simulation, la performance de différentes stratégies. La stratégie la plus performante dépendant de différents paramètres, on a pu modéliser un *métacontrôleur* permettant de choisir dynamiquement entre plusieurs contrôleurs différents.

Par ailleurs, un ensemble d'outils (éditeurs, compilateurs, etc.) ont été développés pour aider à la transformation du modèle à base d'automates temporisés en un système implanté et opérationnel sur une plate-forme à base d'agents. Ces outils effectuent le produit synchronisé des automates du modèle puis appliquent différentes optimisations pour simplifier le modèle résultant, avant de produire le code correspondant.

Publications

Outre la thèse de Dong Yue Wang (Wang 2005), le travail a été publié sous différentes formes, de manière plus ou moins détaillée (Hutzler et Klaudel 2006, Hutzler et al. 2006; 2004b;c;a). Il a par ailleurs donné lieu à un certain nombre d'extensions, d'une part pour la modélisation d'agents mobiles (Benaïssa et al. 2006; 2007), d'autre part par l'ajout d'un langage de modélisation, appelée MIRELA, à partir duquel sont générés automatiquement les modèles à base d'automates temporisés (Didier et al. 2008).

4.3 CONSTRUCTION ET RÉGULATION DE TRAITEMENTS DE DONNÉES

L'utilisation d'outils de vérification apporte des garanties quand à la qualité des solutions proposées mais limite en contrepartie la complexité des solutions d'adaptation proposées. Le travail de Laurent POLIGNY (Poligny 2010) s'intéresse quant à lui à proposer des stratégies d'adaptation indépendamment des contraintes imposées par les outils de vérification. La validation de ces stratégies est alors apportée uniquement par la simulation. Par ailleurs, outre les problématiques de régulation des traitements de données, il s'est intéressé à la construction dynamique de nouvelles architectures de traitement dans le contexte plus large de l'informatique ambiante.

Problématique

As we discovered, stable systems do not exist when we are dealing with rapidly evolving technologies (Russell et al. 2005)

Dans le cadre du projet *J'ai dansé avec MACHINE*, l'architecture de traitement des données est relativement contrainte (voir figure 4.1) et l'objectif principal du point de vue de la régulation consiste à « tenir la cadence » d'acquisition des données de manière à conserver une interaction qui soit toujours la plus fluide possible, tout en étant fondée sur une analyse aussi précise et pertinente que possible de la situation courante. L'utilisation

de formalismes de modélisation des systèmes concurrents temps-réels se justifie dans ce cadre pour assurer que l'on reste en permanence dans les bornes définies pour l'interaction et le travail de D. Y. Wang de ce point de vue apporte une contribution intéressante. En revanche, dès lors que l'on élargit le cadre d'étude à l'informatique ambiante de manière générale (par transposition du scénario d'interaction de *J'ai dansé avec MACHINE*), on passe à une problématique de *construction* et de *régulation* de services pour s'adapter à un *contexte* d'interaction évoluant en permanence, de manière parfois très rapide. Dans ce cadre, le critère important n'est pas tant d'avoir un temps de réaction minimal, que de maintenir un service le plus *pertinent* possible en fonction du contexte d'interaction. Le temps de réponse n'est plus alors qu'un élément parmi d'autres pour décider de cette pertinence.

Les contraintes qui se posent de manière générale sont de différentes natures et peuvent être regroupées en différentes catégories (Weiser 1993, Norman 1998, Russell et al. 2005, Ferry et al. 2010) :

- *contraintes sur les entités* : les ECAs sont par nature ouverts, et des entités peuvent donc entrer ou sortir dynamiquement de l'espace d'interaction. Les entités à partir desquelles un ECA doit être construit sont ainsi *distribuées, hétérogènes, versatiles* (en particulier une entité peut quitter le système ou tomber en panne à n'importe quel moment) ;
- *contraintes sur les services offerts* : le service attendu par l'utilisateur nécessite, selon les cas, d'être ubiquitaire (disponible partout), continu (disponible en permanence), contextuel (adapté au contexte d'interaction), sécurisé. Les services conçus doivent ainsi répondre en particulier à des exigences d'adaptabilité et de robustesse ;
- *contraintes sur les mécanismes d'interaction* : l'interaction n'est plus nécessairement sollicitée de manière explicite par l'utilisateur. Le système doit ainsi mettre à disposition de ce dernier les services qu'il pense lui être utiles en fonction du contexte qu'il a perçu (ressources disponibles, utilisateurs présents).

La problématique à laquelle Laurent Poligny s'est intéressé est alors de mettre en place et réguler l'interaction entre des entités distribuées, hétérogènes et versatiles pour maintenir un ensemble d'informations ou d'actions pertinentes liées au contexte utilisateur.

Positionnement

Le travail se situe globalement dans la thématique de l'*autonomic computing* (Horn 2001), nommé en référence au *système nerveux autonome*, en charge du maintien de l'équilibre du milieu intérieur du corps humain, et des systèmes dotés de propriétés *self-**, à savoir des propriétés d'auto-configuration, d'auto-réparation, d'auto-optimisation, d'auto-protection. (Ganek et Corbi 2003) définissent la notion d'*éléments autonomiques*, les pièces de base des systèmes autonomiques, comme des entités qui contrôlent le comportement d'un élément ou d'un système complet par l'intermédiaire de capteurs, dont ils analysent les données, de manière à déterminer si des actions doivent être envisagées via les effecteurs dont ils disposent. Ce faisant, ils redéfinissent ni plus ni moins que la notion

d'*agent*. C'est d'ailleurs le point de vue adopté par (Nami et Bertels 2007) qui considèrent les éléments autonomiques comme des agents, et les systèmes de calculs autonomiques (ACS) comme des systèmes multi-agents. Chaque élément autonome (AE) est ainsi construit par la combinaison d'un *élément géré* (ME) et d'un *gestionnaire autonome* (AM) chargé de son contrôle. Le système de calcul autonome est construit par les interactions entre les éléments autonomiques, qui partagent un bus de communication.

Pour (Nami et Bertels 2007), les trois grands challenges du domaine résident dans la gestion des relations entre les éléments autonomiques, dans l'apprentissage et l'optimisation de la régulation du système, et dans la robustesse du système. Pour (Parashar et Hariri 2005), il est par ailleurs nécessaire de pouvoir définir, implémenter et contrôler les comportements autonomiques d'un système d'un point de vue aussi bien local que global de manière robuste et prédictible. Il faut noter que la granularité utilisée dans ce type d'approche est généralement relativement élevée puisque les éléments gérés peuvent être des applications logicielles, voire des systèmes entiers. De fait, les interactions entre agents sont souvent limitées. Aussi bien dans le travail de Dong Yue Wang que dans celui de Laurent Poligny, nous nous sommes quant à nous placés à un niveau bien inférieur puisque l'on se situe au niveau des fonctions de traitements au sens de la programmation par flots de données (Sutherland 1966) et il est donc inévitable de devoir gérer l'aspect relationnel et collectif dans le fonctionnement des agents.

La limite des systèmes de calcul autonomiques est qu'ils s'intéressent davantage à la configuration, la gestion, et la réparation de services existants qu'à la création de nouveaux services. Cette dernière problématique est plus étudiée dans le domaine des services Web (voir par exemple (Vallée 2009)), par l'orchestration ou la chorégraphie de services élémentaires pour construire des services de plus haut niveau. A un niveau plus bas, la programmation génétique (Koza 1992) permet de générer des programmes par l'assemblage de primitives élémentaires dans des structures d'arbres, donc potentiellement de constituer de nouveaux services par composition de services élémentaires ou de fonctions de traitement.

Démarche

Laurent Poligny a développé une recherche dans laquelle il s'est intéressé à la fois à la création de nouveaux services et à leur régulation. L'approche adoptée pour la création de comportements est une approche hybride entre la programmation génétique et les métaheuristiques de recherche locale. La régulation des traitements est pour sa part abordée en développant des approches bio-inspirées qui font référence d'une part aux hyperstructures biologiques ou *Functioning Dependant Structures* (Thellier et al. 2004), d'autres part aux colonies de fourmis.

Pour la création de comportements, la démarche a consisté à rechercher une approche qui soit à la fois *any-time*, c'est-à-dire permettant de restituer un comportement appris à n'importe quel moment, distribuable entre les différentes entités du système, et avec la possibilité de restreindre localement certaines fonctionnalités à certaines entités du système. La mé-

thode développée, baptisée *Programmation par Voisinage Contrôlé (PVC)* se base, tout comme la programmation génétique, sur une représentation arborescente des programmes (voir figure 4.3 (a)). Mais alors que la programmation génétique génère aléatoirement des populations de programmes, l'approche *PVC* se base sur les approches de recherche locale de voisinage (*Variable Neighborhood Search*). Le principe de l'algorithme consiste grossièrement à partir d'un programme source puis d'explorer son voisinage immédiat à la recherche d'un meilleur programme. Si un tel programme est trouvé, il devient le nouveau programme source et l'algorithme itère (voir figure 4.3 (b)). L'exploration du voisinage s'effectue en modifiant le programme source par l'application de différents opérateurs de modification. Le contrôle de l'application de ces opérateurs permet de générer, par construction, des programmes dont on sait majorer la distance au programme initial.

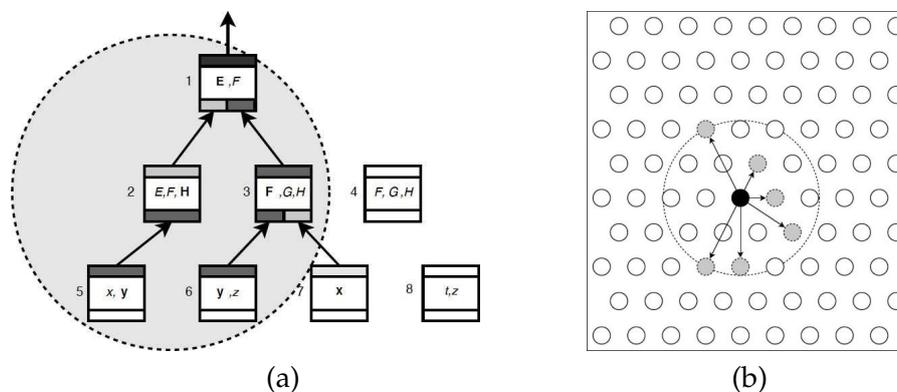


FIGURE 4.3 – (a) les agents sont vus comme des ressources de traitement dans un arbre syntaxique correspondant à un programme (b) principe d'Exploration par Voisinage Contrôlé

Concernant la régulation des traitements, la démarche consiste à développer une approche bio-inspirée. Dans cette approche, l'inspiration provient des hyperstructures biologiques, *Functioning Dependant Structures*. Dans les systèmes biologiques, dans les cascades métabolique ou de signalisation, des enzymes transforment des substrats en produits, relâchent les produits dans le milieu cellulaire jusqu'à ce qu'une autre enzyme les capte, et forment des complexes moléculaires avec d'autres enzymes, ce qui permet d'éviter de relâcher les produits intermédiaires dans le milieu. De manière symétrique, des agents transforment des données brutes en données traitées, et cherchent d'autres agents pour poursuivre le traitement, en contractant éventuellement avec l'un de ces agents pour éviter de devoir chercher à chaque fois des partenaires adaptés. Les hyperstructures peuvent se réarranger pour s'adapter à des conditions environnementales changeantes (e. g. du fructose à la place du glucose dans la glycolyse); de même les coalitions d'agents peuvent-elles modifier leur organisation pour s'adapter à un environnement dynamique (e. g. nouvel utilisateur, nouveaux capteurs, etc.). Les cellules contrôlent leurs fonctions d'une manière distribuée, décentralisée, réactive et adaptative; de même l'objectif est que les systèmes de calcul autonome acquièrent le même type de capacités. Dans ce cadre, le comportement des agents peut être décrit par un automate à états finis (voir figure 4.4) qui se fonde sur la *satisfaction*

ou l'*insatisfaction* des agents de traitement, elle-même fonction de l'*activité* des agents et de la *pertinence* des résultats découlant de cette activité.

Une seconde approche bio-inspirée a été développée pour la régulation des traitements, qui part du constat que le problème de régulation peut être vu de manière analogue au problème de routage de paquets de données dans un réseau. Une adaptation de l'algorithme *AntNet* (Di Caro et Dorigo 1998) a ainsi été proposée.

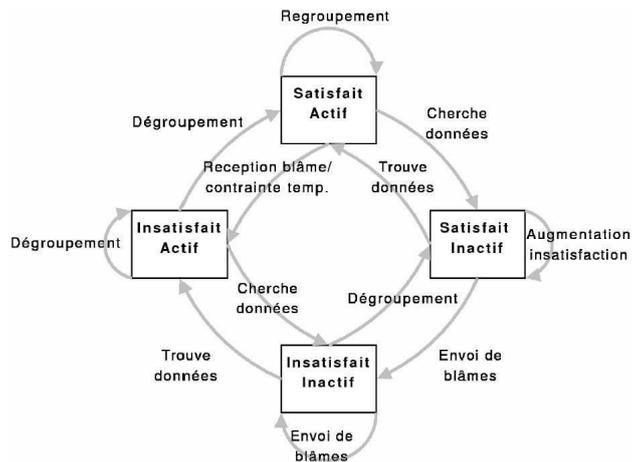


FIGURE 4.4 – Automate à état fini décrivant le comportement des agents de traitement dans une perspective de régulation des chemins de données

Résultats

L'approche de *Programmation par Voisinage Contrôlé (PVC)* a été comparée à la *Programmation Génétique (PG)* pour vérifier le bien-fondée des hypothèses associées à l'approche, notamment la corrélation entre voisinage structurel entre programmes, mesuré sur les structures d'arbres syntaxiques, et le voisinage fonctionnel, mesuré sur les résultats renvoyés par les programmes. Le premier résultat important est cette hypothèse est effectivement vérifiée. Par ailleurs, du fait de la manière dont sont construits les programmes candidats à évaluer dans les deux approches, pour un même nombre de programmes évalués, la *PVC* génère environ quinze fois plus de programmes uniques. Cette beaucoup plus grandes diversité des programmes générés permet en moyenne une convergence plus rapide dans l'approche *PVC*. Enfin, les programmes produits par l'approche *PVC* sont beaucoup plus compacts, donc à la fois plus simples à comprendre et moins sensibles aux perturbations et aux pannes.

Le travail sur la régulation des chemins de données a de même démontré la faisabilité de l'approche proposée. Différentes études sur les paramètres du modèle par hyperstructures ont par ailleurs été effectuées, démontrant la possibilité de contrôler la dynamique du système à travers leur réglage. La comparaison entre les deux approches, par hyperstructures et par colonies de fourmis, montre que cette dernière est plus souple, au sens où elle conduit à une adaptation plus rapide des chemins de traitement des données. Elle s'accompagne cependant de davantage de déséquilibrage, c'est-à-dire que le résultat du traitement de données anciennes peut être disponible après celui de données plus récentes. Cha-

cune a donc potentiellement un intérêt propre, en fonction du contexte d'utilisation.

Publications

Laurent Poligny est actuellement en cours de rédaction de son manuscrit de thèse (Poligny 2010). On peut retrouver les prémices de son travail sur la régulation par hyperstructures dans son mémoire de DEA (Poligny 2006) et une version plus aboutie dans (Poligny et Hutzler 2009). La régulation par colonies de fourmis a d'abord été développée par Adriano Ruivo au cours de son mémoire de recherche d'ingénieur (Ruivo 2007) avant d'être reprise par L. Poligny. Par ailleurs, des articles sont actuellement en cours de préparation sur la construction dynamique d'architectures de traitement.

4.4 RAISONNEMENT PAR ANALOGIE ET ANTICIPATION DU CONTEXTE

How can we transfer the management system knowledge from human experts to ACSs? The master idea is that by observing that how several human experts solve a problem on different systems and by using traces of their activities, a robust learning procedure can be created. (Nami et Bertels 2007)

L'un des enjeux principaux des systèmes de calcul autonome consiste à mettre en œuvre des stratégies d'adaptation efficaces sans pour cela que le ou les utilisateurs aient à réaliser un travail de configuration et d'optimisation qui serait nécessairement long et fastidieux. Pour que l'interaction avec le système reste la plus naturelle possible, l'une des approches privilégiée consiste à permettre au système d'apprendre progressivement à réaliser une telle adaptation par l'observation des stratégies adoptées par des humains confrontés au même problème. Telle était l'ambition de la thèse de Cédric SILÉO, thèse Cifre co-financée par la société Nétizis³ (Siléo 2007)⁴.

Problématique

let me interact with computers as if I'm dealing with a person, but let the system have information processing capabilities no human could ever possess. (Horn 2001)

Le paradigme d'interaction a fondamentalement évolué depuis les débuts de l'informatique. Alors qu'à l'époque des « mainframes », un ensemble de personnes interagissaient avec un système unique (interaction n-1), l'apparition des ordinateurs personnels a individualisé l'interaction entre un utilisateur et un système (interaction 1-1). Le développement actuel de l'informatique ambiante fait basculer définitivement le point de

3. http://www.netizis.com/php_creations/netizis/cms/

4. Pour des raisons industrielles, la thèse a été publiée sous une clause de confidentialité

vue vers une interaction entre un (ou plusieurs) utilisateur(s) et une multitude de systèmes (interaction 1-n ou n-n). Dans le même temps s'opère également un basculement entre un point de vue où l'on demandait à l'utilisateur d'apprendre à se servir d'un système, à s'y adapter, et un point de vue où c'est au système d'apprendre à reconnaître les besoins de l'utilisateur et à s'y adapter. Cette *adaptativité* correspond à « la capacité d'une application, et plus généralement d'une machine, à modifier son fonctionnement face à une classe particulière de problèmes, en vue de les résoudre. Ces problèmes, proposés par un utilisateur, sont ceux pour lesquels elle n'est pas conçue a priori, mais pour lesquels elle dispose de moyens de résolution et d'adaptation suffisants » (Siléo 2007).

L'adaptation peut consister à permettre à des utilisateurs sans aucune compétence technique d'interagir avec des systèmes ambiants, par exemple dans un contexte domotique. Elle consistera dans ce cadre à aider l'utilisateur à interagir avec son environnement de la manière la plus naturelle possible. Elle peut également concerner des utilisateurs experts tels que des administrateurs système pour les aider à gérer des systèmes de plus en plus complexes. Dans un cas comme dans l'autre, il est important de détecter les régularités dans le comportement de l'utilisateur. Dans le cas de la domotique, parce que l'utilisateur a l'habitude de réaliser certains comportements toujours dans le même contexte et toujours de la même manière, par exemple ouvrir les volets en se levant, les fermer en se couchant, allumer la lumière en entrant dans une pièce sombre, l'éteindre en en sortant, etc. Le système domotique pourra utilement repérer de telles tâches qui se répètent et les automatiser. Dans le cas de la gestion du système par un administrateur, ce dernier applique un certain nombre de procédures qu'il répète à intervalles plus ou moins réguliers. A la différence des habitants d'une maison domotique, ce dernier sait automatiser et programmer l'exécution de tâches. Il pourra alors apprendre au système à réaliser ces tâches, le système pouvant ensuite les transposer de manière à prendre le relais pour l'administration de systèmes plus complexes.

On peut généraliser cette problématique comme la reconnaissance et l'automatisation de tâches répétitives. Pour ce faire, les systèmes doivent en premier lieu développer des capacités de perception de leur *environnement* et de leur *contexte* d'exécution (Rey 2005). Outre les mécanismes de captation, cela nécessite surtout de disposer de moyen de représenter cette connaissance sur l'environnement de manière à la fois souple et efficace pour formuler facilement les problèmes à résoudre. Un fois le problème décrit, le système doit également disposer de moyens de résolution de problème versatiles. Enfin, il peut avoir besoin de l'aide de l'utilisateur, et il est donc important que ce dernier dispose de moyens de transmettre des solutions ou éléments de solutions au système. Enfin, l'utilisateur doit pouvoir évaluer la manière dont le système a compris le problème et de quelle manière il va le résoudre, de manière à pouvoir intervenir le cas échéant.

Positionnement

Cédric Siléo a identifié un certain nombre de bonnes caractéristiques que devrait posséder un logiciel d'automatisation, aussi bien dans le processus d'automatisation que dans la réalisation de l'automatisation. On peut illustrer ces caractéristiques en se basant sur l'exemple du réglage, tous les soirs de la semaine, d'un radio-réveil.

Dans le processus d'automatisation, le système devrait :

- *déterminer automatiquement les exemples* (i.e. détection de motifs) : il ne devrait pas être nécessaire de spécifier explicitement au radio-réveil qu'un premier réglage est un exemple, qu'un deuxième, le lendemain, est un autre exemple, etc.
- *établir aisément des relations d'analogies, abstraire et détecter des paramètres entre les différents exemples* : si, pour une semaine, le réglage s'effectue le lundi, le mercredi, etc., et pour une autre semaine le mardi, le jeudi, etc., alors le radio-réveil devrait pouvoir détecter que le réglage se fait tous les deux jours, à partir d'un certain jour qui est fonction de la semaine.
- *déduire le contexte suivant en fonction des précédents* (prédiction de contextes) : si le réglage du radio-réveil se fait tous les deux jours, le contexte suivant devrait donc être déduit comme étant la même heure deux jours plus tard.
- *être tolérant* : au bruit dans un exemple (si l'utilisateur du radio-réveil appuie par inadvertance sur un autre bouton pendant le réglage, cette action devrait pouvoir être ignorée); à un ordre différent des séquences d'actions (si l'utilisateur règle d'abord les minutes puis les heures et le lendemain les heures, puis les minutes, alors il devrait être possible de déterminer que l'ordre de la séquence, ici, n'est pas important)

Dans la réalisation de l'automatisation, le système devrait :

- *prévisualiser l'application* : le radio-réveil devrait pouvoir indiquer ce qu'il a compris de la répétition quotidienne du réglage, en affichant, par exemple, ce qu'il compte faire le lendemain à ce propos.
- *exécuter la tâche* : automatiquement dès qu'un contexte est détecté (si le réglage a lieu à la même heure chaque jour, dès que cette heure survient, le radio-réveil devrait pouvoir faire le réglage); dans un ensemble choisi de contextes (l'utilisateur devrait pouvoir indiquer au radio-réveil les jours sur lesquels faire le réglage de l'alarme); un certain nombre de fois (l'utilisateur devrait pouvoir spécifier un nombre de jours pour lesquels le radio-réveil règle l'alarme)

Cédric Siléo a proposé de répertorier quatre grandes catégories d'automatiseurs répandus et avec un certain niveau de maturité, ce qui excluait la programmation par l'exemple, bien qu'elle constitue le paradigme privilégié pour l'automatisation de tâches répétitives. Les catégories répertoriées sont les suivantes :

- les langages de scripts (tels que les scripts en ligne de commande type shell, dos, Visual Basic ou AppleScript) plutôt réservés aux utilisateurs experts ;
- les utilitaires type agenda comme les démons type cron ;

- les macro-commandes qui sont une série de commandes exécutées l'une après l'autre toujours dans le même ordre ;
- les logiciels spécialisés dans l'automatisation, la plupart basés sur le principe des macro-commandes et souvent spécialisés à une application donnée.

Démarche

Si on devait classifier les comportements de la machine intelligente du futur, on pourrait le faire sur la base des capacités de la machine à avoir un raisonnement temporel sur des entités interdépendantes qui changent avec le temps ; à avoir un raisonnement spatial pour résoudre des problèmes qui traitent d'entités situées dans l'espace ; et, à un niveau plus complexe, à raisonner sur des entités interdépendantes situées dans l'espace et qui changent dans le temps par rapport à leurs caractéristiques et à leurs interrelations spatiales. (Kak 1988)

Remarquant l'importance énorme de la manipulation des concepts spatiaux dans tous types de modes de raisonnements, et différents types d'intelligence (Gardner 1993) (linguistique, musicale, logico-mathématique, kinesthésique, etc.), probablement liée au rôle prépondérant de la modalité visuelle dans la perception humaine, C. Siléo a proposé de fonder la représentation des problèmes à résoudre en adoptant un formalisme permettant de décrire des relations spatiales entre objets et de raisonner dessus. Constatant par ailleurs la nature *qualitative* de ces notions spatiales (correspondant à la vision topologique de l'espace évoquée dans la section 3.1), il a proposé de se baser sur le *Raisonnement Spatial Qualitatif (RSQ)* (Escrig et Toledo 1998).

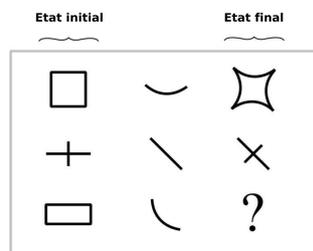


FIGURE 4.5 – Exemple de Matrice Progressive de Raven : la colonne de gauche correspond à l'état initial, la colonne de droite à l'état final, le problème consiste à déterminer l'état final en bas à droite de la matrice

Ce formalisme est utilisé pour construire une représentation du problème d'automatisation sous la forme d'une *Matrice Progressive de Raven (MPR)*, voir figure 4.5) (Raven 2004), c'est-à-dire d'un ensemble de figures reliées par une relation d'analogie. L'automatiseur est alors construit comme un système à base de règles, qui est composé d'une base de connaissances fondée sur le RSQ, d'une base de faits formulés sous la forme d'une MPR et d'un moteur d'inférence, qui consiste en un système multi-agent hybride fondé sur une architecture de tableau noir, inspiré du système Copycat (Mitchell 1993, Hofstadter 1995). La matrice est remplie, avec une approche typique de la Programmation par l'Exemple (*PpE*) (Cypher 1993, Lieberman 2001), par l'observation des événements produits par l'utilisateur dans son interaction avec le système (via la souris,

le clavier ou n'importe quel type de dispositif de captation). Grâce à son moteur d'inférence, le système déduit une règle basée sur des relations spatiales entre les différents éléments de la matrice, règle qui correspond à l'automatisation de la tâche (voir figure 4.6).

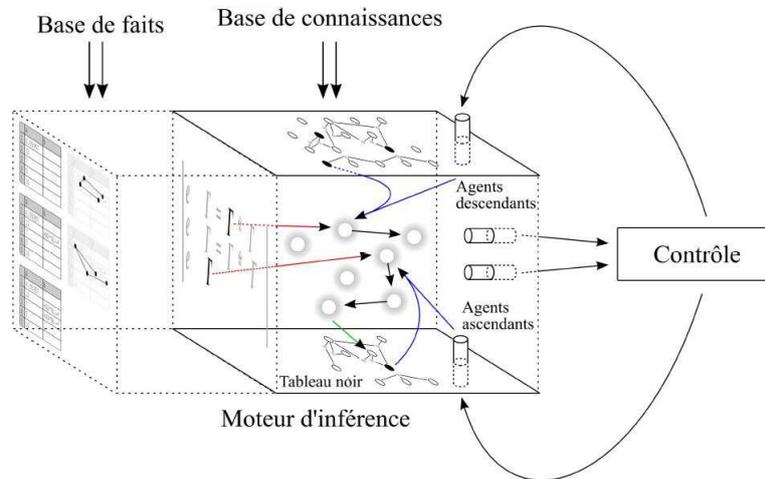


FIGURE 4.6 – Architecture du moteur d'inférence de l'automatiseur

Résultats

Un prototype d'automatiseur destiné aux utilisateurs non-experts a été développé, potentiellement exploitable pour n'importe quelle application. Composé d'un système à base de règles, il est capable d'observer l'utilisateur qui lui montre des exemples d'une tâche répétitive, d'exprimer ensuite l'automatisation sous la forme d'un problème d'analogie et enfin d'inférer de manière décentralisée des règles basées sur des relations spatiales entre ces exemples. Trois exemples ont été développés, l'un pour un traitement de texte, le deuxième pour un navigateur Web, le troisième pour un tableur. L'automatiseur a fait preuve, dans ce cadre, d'un comportement satisfaisant, et l'on a pu étudier notamment sa tolérance au bruit et sa vitesse d'exécution en fonction du nombre d'évènements à gérer.

Publications

Une extension du travail réalisé par Cédric Siléo pendant son DEA sur la programmation par démonstration d'un système multi-agent a été publiée dans (Siléo et Hutzler 2003). La thèse a quant à elle été publiée et soutenue sous une clause de confidentialité, ce qui explique qu'elle n'ait donné lieu à aucune publication.

4.5 INTERACTION HOMME-ROBOT FONDÉE SUR LES ÉMOTIONS

Comme je l'ai évoqué précédemment, la prise en compte des aspects émotionnels me semble tout à fait essentielle, non seulement dans un contexte artistique mais également dans celui de l'informatique ambiante, et plus généralement de l'interaction homme-machine ou homme-robot.

En reconnaissant les émotions exprimées par l'utilisateur, et en raisonnant dessus, l'objectif est de proposer à ce dernier une interaction plus naturelle, plus personnelle, et finalement d'augmenter l'acceptabilité du système. C'est tout l'enjeu de la thèse de Thi Hai Ha DANG. Du fait du scénario d'interaction étudié, entre un musicien et un robot, la thèse est co-encadrée par Philippe HOPPENOT (IBISC), roboticien, et Damien EHRHARDT (RASM), musicologue.

Problématique

Pour être en mesure d'offrir une interaction « naturelle » à des utilisateurs, et d'anticiper leurs besoins, il apparaît particulièrement important de pouvoir reconnaître et utiliser leurs états affectifs ou états émotionnels, ce qui est l'objet de l'*informatique affective* (Picard 1997). Cela est particulièrement vrai dans le domaine social, où le facteur humain joue un rôle prépondérant (thérapie robotisée, hôtesse ou guide robotique, robot d'assistance, etc.). (Pantic et al. 2005) soulignent que « les systèmes d'interaction homme-machine capables de percevoir le stress, l'inattention et la concentration, et capables de s'adapter et de répondre à ces états affectifs des utilisateurs seront probablement perçus comme plus naturels, plus efficaces et dignes de confiance ». Pour cela, l'analyseur « idéal » devrait selon eux être : « multimodal (...) ; robuste et précis (...) ; générique (...) ; sensible à la dynamique des expressions affectives (...) ; sensible au contexte (...) ».

Du point de vue des modalités de perception, elles sont généralement limitées à la reconnaissance des expressions faciales, des attitudes corporelles, des intonations vocales (Pantic et al. 2005), et parfois à l'analyse des signaux physiologiques (Herbon et al. 2006). Nous nous sommes pour notre part intéressés à la modalité musicale, rarement étudiée dans ce contexte. Le principe de l'étude est de se placer dans le cadre d'une interaction entre un musicien et un robot, ce dernier devant répondre à la musique par la réalisation d'une danse, en se basant sur les qualités émotionnelles de la musique. A cet effet, il a pour tâche d'analyser le flux musical provenant du musicien, d'y reconnaître l'expression de différentes émotions, et d'y répondre par des éléments chorégraphiques traduisant les émotions reconnues.

Même si les rôles sont ici inversés entre l'homme et la machine, on retrouve, dans ce choix de scénario, la marque des projets MACHINE, et *J'ai dansé avec MACHINE*, à savoir la mise en scène métaphorique, sous forme de performance artistique interactive, de situations de la vie réelle qui sont représentatives des enjeux majeurs pour la recherche en informatique et en robotique. En effet, de même que pour les systèmes d'interaction logiciels, l'objectif d'une interaction naturelle et confortable avec un robot requiert de la part de ce dernier des capacités de manipulation d'une représentation des états mentaux humains, devant lui permettre d'établir des interactions sociales coopératives (Pentland 2005). Nombre d'expérimentations en robotique ont ainsi souligné le côté gratifiant pour l'homme d'interagir avec des robots « intelligents ». Par ailleurs, différents auteurs (Gebhardt et von Georgi 2007, Zentner et al. 2008) soulignent que l'at-

trait universel de la musique s'explique en grande partie par les émotions qu'elles suscitent chez l'auditeur.

Positionnement

Where music is special is the resources it offers for stimulating the progress of emotional states, and in particular rapid changes between such states (Zbikowski 2010)

Dans le cadre de l'interaction musicien-robot, l'objet de la recherche est double : d'une part analyser de manière automatique un flux musical pour en construire une description en termes émotionnels, d'autre part élaborer un modèle dynamique des émotions permettant au robot de se construire une représentation de son propre état affectif et de celui du musicien avec lequel il interagit. Couplé à un modèle comportemental, ce modèle des émotions doit lui permettre d'établir une sorte d'« accordage affectif » (Stern 1989) avec le musicien.

Le ressenti émotionnel associé à la musique peut apparaître au premier abord comme une expérience éminemment subjective. Indépendamment des goûts musicaux des uns et des autres, l'émotion ressentie à l'écoute d'un morceau peut en effet être modulée par le contexte dans lequel le morceau est joué, l'humeur et la personnalité de l'auditeur, sa culture, etc. Un certain nombre d'études (Krumhansl 1997, Blood et al. 1999) semblent cependant suggérer un consensus fort dans la manière d'associer des échantillons musicaux à un nombre limité de grandes catégories d'émotions (typiquement entre quatre et six émotions de base parmi lesquelles la colère, la peur, la tristesse, la joie, le dégoût, la surprise). Par ailleurs, différentes études montrent un lien entre les émotions ressenties et la structure syntaxique de la musique (la hauteur des notes, le rythme, le tempo, le contour de la mélodie, la tonalité, le timbre, le volume, la spatialisation, etc. (Krumhansl 1997) relève ainsi que les échantillons choisis pour exprimer la tristesse sont caractérisés par des tempos très lents, des harmonies mineures, et un contraste faible dans les hauteurs de notes et la dynamique ; les extraits choisis pour représenter la peur ont des tempos plus rapides avec des accélérations, des harmonies dissonantes, des changements rapides de dynamique et large intervalle de hauteur de notes ; enfin, les extraits représentatifs de la joie ont des tempos rapides, des rythmes « dansants », des harmonies majeures et des dynamiques et intervalles de hauteurs de notes plutôt constants.

Il semble donc *a priori* possible d'automatiser la classification de séquences musicales selon un nombre prédéterminé d'émotions, en se basant sur une analyse syntaxique de la musique. Mais la partition musicale n'est sans doute pas suffisante puisque de nombreux travaux soulignent que l'émotion est un processus temporel (Scherer 2001). En plus des informations musicales disponibles à un certain moment, il semble ainsi nécessaire de prendre en compte la dynamique de ce processus, donc de s'intéresser aux théories psychologiques de l'émotion. Les modèles les plus populaires, repris dans la plupart des autres travaux sont le *modèle d'évaluation des événements* (Ortony et al. 1988), le *modèle d'évaluation et d'adaptation* (Lazarus et Folkman 1984) et le *modèle des composantes* (Scherer 2001). Thi Hai Ha Dang en a proposé une synthèse sous la forme du modèle

computationnel *GRACE*⁵ (voir figure 4.7) pour permettre à des robots de manipuler les émotions (Dang et al. 2008, Dang et Duhaut 2009).

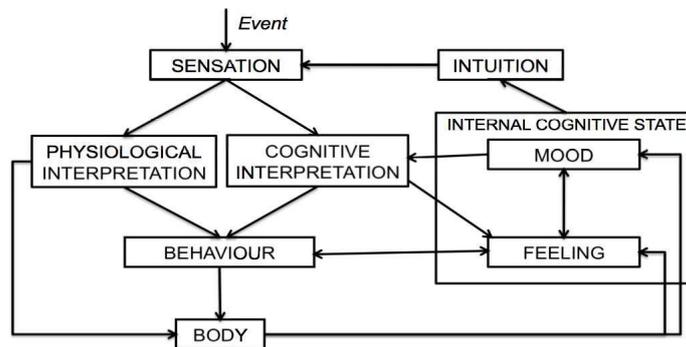


FIGURE 4.7 – Architecture du modèle GRACE (Generic Architecture to Create Emotions)

Démarche

Sur la base d'une description MIDI d'un flux musical (séquence d'évènements musicaux de type « début de note » ou « fin de note »), Ha DANG a, dans un premier temps, cherché à instancier le bloc *Interprétation cognitive* du modèle *GRACE*, c'est-à-dire transformer une séquence d'évènements musicaux en une séquence d'« émotions » véhiculées par la musique. Pour ce faire, nous avons travaillé avec des musicologues, en complément des connaissances en neurobiologie de la perception musicale, pour extraire les éléments de structuration musicale *a priori* les plus saillants et les plus pertinents pour exprimer des émotions. Ces dernières ont été définies comme l'association de deux coordonnées dans un repère orthonormé (*valence, énergie*). La valence est utilisée dans certaines théories psychologiques pour mesurer l'attraction (valence positive) ou l'aversion (valence négative) pour des évènements ou des situations. La colère, la peur, la tristesse sont ainsi associées à une valence négative, tandis que la joie est associée à une valence positive. L'énergie correspond quant à elle à une intensité ou à une tension associée à l'émotion. Du côté des valences négatives, la colère et la peur sont ainsi associées à des énergies fortes tandis que la tristesse est associée à une énergie faible. Du côté des valences positives, la joie est associée à une énergie forte tandis que la sérénité est associée à une énergie faible. Nous avons par ailleurs développé une interface⁶ permettant aux musicologues d'annoter en temps-réel les émotions associées au flux musical, dans ce repère (*valence, énergie*) (voir figure 4.8). Ha a enfin conçu un réseau de neurones pour apprendre au système la manière d'associer les éléments de structuration musicale (en entrée), à des valeurs de valence et d'énergie.

Dans un deuxième temps, nous avons retravaillé le modèle générique *GRACE* de manière d'une part à l'adapter à des interactions émotionnelles utilisant la modalité musicale, et d'autre part à l'opérationnaliser pour en tirer un modèle computationnel. Dans ce travail en cours, nous cherchons à identifier ce qui, dans le modèle, peut être considéré comme réellement générique, c'est-à-dire indépendant de telle ou telle modalité de perception

5. Generic Robotic Architecture To Create Emotions

6. avec la plate-forme Netlogo (Wilensky 1999)

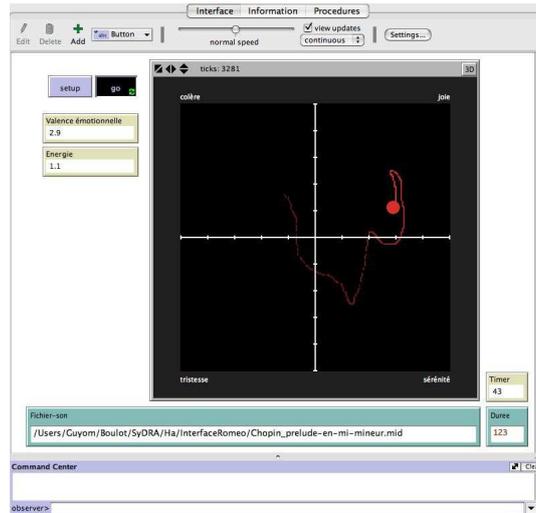


FIGURE 4.8 – Interface d’annotation en temps-réel de séquences musicales, utilisant le repère (valence, énergie); la valence est en abscisse, l’énergie en ordonnée

ou d’expression, et ce qui doit être instancié en fonction de ces modalités, c’est-à-dire propres à certains capteurs ou effecteurs à disposition du système d’interaction.

Résultats

Pour mettre à l’épreuve les hypothèses présentées, un corpus de pièces de Robert SCHUMANN a été élaboré avec les musicologues. Ce corpus a été conçu pour être à la fois homogène, avec des pièces d’un même compositeur, et en même temps représentatif des différentes émotions à modéliser, c’est-à-dire couvrant au maximum le repère (valence, énergie). Les séquences ont été annotées par un musicologue, et ces annotations ont servi à l’apprentissage du réseau de neurones. Les premiers résultats, partiels, suggèrent que l’énergie est plus facile à reconnaître par le système que la valence, ce qui n’est pas très étonnant puisqu’elle est sans doute aussi moins subjective.

Le modèle GRACE a été adapté et il est maintenant en cours d’implémentation. Par ailleurs, Ha DANG a commencé à élaborer un répertoire de primitives chorégraphiques pour construire la réponse « dansée » du robot, et à tester ces primitives en simulation.

Publications

La conception du modèle GRACE a fait l’objet du stage de master de Ha DANG et a été publiée dans (Dang et al. 2008) et (Dang et Duhaut 2009). L’adaptation proposée pour exploiter la modalité musicale est publiée dans (Dang et al. 2010).

DISCUSSION - CONCLUSION

Le spectre est large entre le focus porté sur les architectures logicielles dans les sections 4.2 et 4.3, et celui porté sur la modélisation de l’utilisateur

dans les sections 4.4 et 4.5, avec des approches et des outils de modélisation variés, eux aussi. Si le spectre est aussi large, c'est qu'il me semble que l'on ne pourra pas atteindre l'objectif d'une interaction utile et naturelle entre l'homme et son environnement informatisé, si l'on s'intéresse seulement à l'homme ou seulement à l'environnement. Bien évidemment, étudier l'un *et* l'autre mais de manière dissociée n'est pas suffisant, pas plus que ne le serait l'étude d'un corps humain par l'étude isolée de chacun de ses organes. Il reste ainsi un large chantier pour créer du lien entre les deux types de recherches :

- Dans la démarche de construction automatique d'architectures de traitement de données, et de leur régulation (section 4.3), un critère essentiel d'appréciation de la performance d'une architecture est apporté par la notion de *pertinence*, pour l'utilisateur, des informations fournies par le système. Il paraît très difficile de penser que cette pertinence puisse, dans le cas général, être appréciée automatiquement par le système lui-même, indépendamment de l'utilisateur qui a demandé la mise à disposition d'un service donné. Le modèle proposé par L. POLIGNY est inspiré d'un modèle très simplifié d'émotions dans lequel les agents sont satisfaits ou frustrés dans le travail qu'ils réalisent. En intégrant un modèle émotionnel dérivé de *GRACE* et en recevant des retours de la part de l'utilisateur, ces agents pourraient chercher à adapter leur fonctionnement de manière à faire augmenter la valence émotionnelle chez cet utilisateur.
- Se pose par ailleurs la question de la *manière* dont celui-ci pourra *formuler* sa demande de service. La démarche d'automatisation de tâches répétitives présentée dans la section 4.4 semble de ce point de vue bien adaptée. Dans l'automatisation de tâches répétitives en effet, l'utilisateur montre au système la réalisation d'une tâche donnée, mais de différentes manières, correspondant à l'instanciation de la tâche dans des contextes à chaque fois légèrement différents. Il s'agirait alors d'apprendre à un système d'informatique ambiante à fournir un service en lui montrant différents exemples de réalisation du service, à charge pour le système d'abstraire ce qui fait que les différents exemples montrés ne sont des instances successives d'un même problème.
- Plusieurs auteurs ont souligné les rapports entre perception musicale et perception spatiale. Les techniques d'imagerie permettent en effet d'observer l'activation de certaines aires corticales dédiées à la perception spatiale lors de l'écoute musicale. Il pourrait ainsi être pertinent de décrire un flux musical grâce au raisonnement spatial qualitatif, et de voir le problème d'analyse des émotions transmises par la musique comme un problème d'analogie entre séquences musicales représentées à l'aide du *RSQ*.
- Enfin, puisque je me suis placé dans le cadre du projet *MACHINE*, il reste à concevoir des dispositifs ou des environnements suffisamment riches pour pouvoir expérimenter de manière réaliste les concepts et les outils présentés et ceux que je propose de développer.

De même que pour la simulation à base d'agents, la feuille de route reste donc extrêmement chargée. Par ailleurs, j'avais souligné en conclusion du chapitre précédent la nécessité de réintroduire l'humain au cœur

de la simulation à base d'agents. Il reste donc à voir comment ce rapprochement pourra s'opérer, ce qui sera le sujet du chapitre de conclusion. On pourra voir par la même occasion que l'humain, paradoxalement, ne doit pas être oublié non plus dans les environnements ambiants intelligents, si l'on souhaite que ceux-ci restent *au service* de l'homme, et non pas qu'ils *l'asservissent*.

BIBLIOGRAPHIE

- R. Alur et D. L. Dill. A Theory of Timed Automata. *Theoretical Computer Science*, 126 :183–236, April 1994. (Cité page 77.)
- E. M. Atkins, T. F. Abdelzaher, K. G. Shin, et E. H. Durfee. Planning and Ressource Allocation for Hard Real-Time, Fault Tolerant Plan Execution. *Journal of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 4 :57–78, March 2001. (Cité page 76.)
- H. Atlan. *Entre le cristal et la fumée. Essai sur l'organisation du vivant*. Seuil, Paris, 1979. (Cité page 7.)
- A. Attoui. *Les systèmes multi-agents et le temps-réel*. Eyrolles, Paris, 1997. (Cité page 76.)
- M. A. Bedau. Weak Emergence. Dans James Tomberlin, éditeur, *Philosophical Perspectives : Mind, Causation, and World*, volume 11, pages 375–399. Blackwell Publishers, 1997. (Cité page 55.)
- N. Benaïssa, B. Djafri, G. Hutzler, et H. Klaudel. Towards modelling and verification of mobile agent systems. Dans *Workshop on Industrial Applications of Distributed Intelligent Systems (INADIS'2006)*, Proceedings of the INADIS IBERAMIA-SBIA-SBRN 2006 Workshop. Springer Verlag, 2006. (Cité page 80.)
- N. Benaïssa, B. Djafri, G. Hutzler, et H. Klaudel. Modeling and validation of mobile agent systems : a case study. *INFOCOMP Journal of Computer Science*, Special Edition :09–15, February 2007. (Cité page 80.)
- J. A. Bergstra et J. W. Klop. Process theory based on bisimulation semantics. Dans *Linear time, branching time and partial orders in logic and models for concurrency*, LNCS 354, pages 50–122. Springer, 1989. (Cité page 77.)
- C. Bertelle, A. Dutot, F. Guinand, et D. Olivier. Organization Detection for Dynamic Load Balancing in Individual-based Simulations. *Multiagent and Grid Systems : special issue on Nature-Inspired Systems for Parallel, Asynchronous and Decentralized Environments*, 3(1) :141–163, 2007. (Cité page 56.)
- B. Berthomieu, P.-O. Ribet, et F. Vernadat. The tool TINA - Construction of Abstract State Spaces for Petri Nets and Time Petri Nets. *International Journal of Production Research*, 42, July 2004. (Cité page 77.)
- G. Beurrier, O. Simonin, et J. Ferber. Model and simulation of multi-level emergence. Dans *proc. IEEE ISSPIT 2002*, pages 231–236, 2002. (Cité page 56.)

- A. J. Blood, R. J. Zatorre, P. Bermudez, et A. C. Evans. Emotional responses to pleasant and unpleasant music correlate with activity in paralimbic brain regions. *Nature Neuroscience*, 2 :382–387, 1999. (Cité page 91.)
- E. Bonabeau et J.-L. Dessalles. Detection and emergence. *Intellectica*, 25 (2) :85–94, 1997. (Cité page 55.)
- E. Bonabeau, J.-L. Dessalles, et A. Grumbach. Characterizing Emergent Phenomena (1) : A Critical Review. *Revue Internationale de Systémique*, 9 (3) :327–346, 1995a. (Cité pages 54 et 55.)
- E. Bonabeau, J.-L. Dessalles, et A. Grumbach. Characterizing Emergent Phenomena (2) : A Conceptual Framework. *Revue Internationale de Systémique*, 9(3) :347–371, 1995b. (Cité page 55.)
- F. Boschetti et R. Gray. Emergence and Computability. *Emergence : Complexity and Organization*, 9(1-2) :120–130, 2007. (Cité page 55.)
- F. Boschetti, M. Prokopenko, I. Macreadie, et A.-M. Grisogono. Defining and Detecting Emergence in Complex Networks. Dans *KES (4)*, pages 573–580, 2005. (Cité page 55.)
- O. Brdiczka, J. Maisonnasse, et P. Reignier. Automatic detection of interaction groups. Dans *ICMI*, pages 32–36, 2005. (Cité page 56.)
- O. Brdiczka, J. Maisonnasse, P. Reignier, et J. L. Crowley. Detecting small group activities from multimodal observations. *Appl. Intell.*, 30(1) :47–57, 2009. (Cité page 56.)
- S. A. Brueckner et H. Van Dyke Parunak. Resource-aware exploration of the emergent dynamics of simulated systems. Dans *AAMAS'03 : Proceedings of the second international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*, pages 781–788, New York, NY, USA, 2003. ACM Press. (Cité page 50.)
- S. Bura, F. Guerin-Pace, H. Mathian, D. Pumain, et L. Sanders. Multi-agents system and the dynamics of a settlement system. *Geographical Analysis*, 28(2) :161–178, 1996. (Cité page 32.)
- B. Calvez. *Exploration de l'espace des paramètres d'un modèle à base d'agents*. Thèse de doctorat, Université Evry-Val d'Esonne, 2007. (Cité pages 36, 48 et 53.)
- B. Calvez et G. Hutzler. Automatic tuning of agent-based models using genetic algorithms. Dans Luis Antunes et Jaime Simao Sichman, éditeurs, *Proceedings of the 6th International Workshop on Multi-Agent Based Simulation (MABS'05)*, LNAI 3891, pages 39–50, 2005a. (Cité pages 50, 52 et 53.)
- B. Calvez et G. Hutzler. Exploration de l'espace de paramètres d'un modèle à base d'agents. Dans *7èmes Rencontres nationales Jeunes Chercheurs en Intelligence Artificielle 2005*, pages 99–112, Grenoble, 2005b. Presses Universitaires de Grenoble. (Cité page 53.)

- B. Calvez et G. Hutzler. Parameter Space Exploration of Agent-Based Models. Dans Lakhmi C. Jain Rajiv Khosla, Robert J. Howlett, éditeur, *Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems : 9th International Conference (KES 2005)*, volume 3684 de LNCS, pages 633–639, 2005c. (Cité pages 50 et 53.)
- B. Calvez et G. Hutzler. Adaptive Dichotomic Optimization : a New Method for the Calibration of Agent-Based Models. Dans A. Tanguy C. Bertelle J. Sklenar et G. Fortino, éditeurs, *Proceedings of the 2007 European Simulation and Modelling Conference (ESM'07)*, pages 415–419, 2007a. (Cité page 53.)
- B. Calvez et G. Hutzler. Ant Colony Systems and the Calibration of Multi-Agent Simulations : a New Approach. Dans G. Di Marzo Serugendo S. Hassas et D. Phan, éditeurs, *Multi-Agents for modelling Complex Systems (MA4CS'07) Satellite Workshop of the European Conference on Complex Systems 2007 (ECCS'07)*, 2007b. (Cité page 53.)
- B. Calvez et G. Hutzler. Optimisation dichotomique adaptative : une nouvelle méthode pour le calibrage de modèles à base d'agents. Dans *Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents 2008*, pages 181–190, 2008. (Cité page 53.)
- A. Camurri, I. Lagerlöf, et G. Volpe. Recognizing emotion from dance movement : comparison of spectator recognition and automated techniques. *International Journal of Human Computer Studies*, 59 :213–225, 2003. (Cité page 72.)
- A. Camus. *Discours de Suède*. Éditions Gallimard, Collection NRF, Paris, 1958. (Cité page 7.)
- D. J. Chalmers. Strong and Weak Emergence. Dans P. Davies et P. Clayton, éditeurs, *The Re-Emergence of Emergence*. Oxford University Press, 2006. (Cité page 55.)
- C.-C. Chen, C. D. Clack, et S. B. Nagl. Identifying Multi-Level Emergent Behaviors in Agent-Directed Simulations using Complex Event Type Specifications. *Simulation*, 86(1) :41–51, 2010. (Cité pages 56 et 57.)
- E. Clarke, E. A. Emerson, et A. P. Sistla. Automatic verification of finite-state concurrent systems using temporal-logic specifications. *ACM Transactions on Programming Languages and Systems*, 8 :244–263, April 1996. (Cité page 77.)
- E. Colle. Interaction homme-robot dans le cadre de la personne handicapée ou dépendante. Dans *Actes des Journées Nationales de la Recherche en Robotique 2007*, 2007. (Cité page 74.)
- J. Coutaz. L'art de communiquer à plusieurs voies. *La Recherche*, Numéro spécial : l'ordinateur au doigt et à l'œil :66–73, 1996. (Cité page 19.)
- A. Cypher. *Watch What I Do : Programming by Demonstration*. MIT Press, Cambridge, MA, U.S.A., May 1993. (Cité page 88.)

- T. H. H. Dang et D. Duhaut. Experimentation with GRACE, the Generic Model of Emotions For Computational Applications. Dans *2nd Mediterranean Conference on Intelligent Systems and Automation*, 2009. Best paper award. (Cité pages 92 et 93.)
- T. H. H. Dang, G. Hutzler, et P. Hoppenot. How to gain emotional rewards during human-robot interaction using music ? formulation and propositions. Dans L. Rutkowski et al., éditeur, *10th International Conference on Artificial Intelligence and Soft Computing ICAISC 2010, Part II*, LNAI 6114, pages 247–255, Berlin, 2010. Springer-Verlag. (Cité page 93.)
- T. H. H. Dang, S. Letellier-Zarshenas, et D. Duhaut. GRACE - Generic Robotic Architecture To Create Emotions. Dans *11th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines - CLAWAR 2008*, September 2008. (Cité pages 92 et 93.)
- C. Darwin. *L'origine des espèces par le moyen de la sélection naturelle, ou la préservation des races favorisées dans la lutte pour la vie*. Flammarion, Paris, 2008. (Cité page 7.)
- T. De Wolf et T. Holvoet. Emergence Versus Self-Organisation : Different Concepts but Promising When Combined. Dans *Engineering Self-Organising Systems*, pages 1–15, 2004. (Cité pages 54, 55 et 59.)
- J. Deguet, L. Magnin, et Y. Demazeau. Elements about the emergence issue : A survey of emergence definitions. *ComplexUs*, 3 :24–31, 2006. (Cité page 55.)
- M. Delâge, F. Le Néchet, et T. Louail. ACCESSIM : modélisation et simulation d'accessibilité et d'inégalités géographiques dans la ville. *Mappemonde*, 4(92), 2008. (Cité page 62.)
- J.-L. Dessalles, J. Ferber, et D. Phan. Emergence in Agent based Computational Social Science : conceptual, formal and diagrammatic analysis. Dans Y. Shyan et A. Yang, éditeurs, *Intelligent complex adaptive systems*, Chapitre 9, pages 255–299. IGI Global, 2008. (Cité page 55.)
- J.-L. Dessalles, J.-P. Müller, et D. Phan. Emergence in multi-agent systems : conceptual and methodological issues. Dans Frédéric Amblard et Denis Phan, éditeurs, *Agent-based modelling and simulation in the social and human sciences*, pages 327–355. The Bardwell-Press, Oxford, 2007. (Cité page 55.)
- G. Di Caro et M. Dorigo. AntNet : Distributed Stigmergetic Control for Communications Networks. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 9 : 317–365, 1998. (Cité page 84.)
- J.-Y. Didier, B. Djafri, et H. Klauedel. The MIRELA framework : modeling and analyzing mixed reality applications using timed automata. Dans *Proceedings of the Virtual Reality International Conference VRIC'08*, pages 189–199, 2008. (Cité page 80.)
- R. Dorat, B. Conein, et N. Auray. Multi-level analysis of an interaction network between individuals in a mailing-list. *Annals of Telecommunications*, 62(3-4) :325–349, 2007. (Cité page 56.)

- M. Dorigo et G. Di Caro. New Ideas in Optimization. Dans M. Dorigo D. Corne et F. Glover, éditeurs, *The Ant Colony Optimization Meta-Heuristic*, pages 11–32. McGraw-Hill, 1999. (Cité page 51.)
- A. Drogoul. *De la simulation multi-agents à la résolution collective de problèmes - Une étude de l'émergence de structures d'organisation dans les systèmes multi-agents*. Thèse de doctorat, Université Paris 6, 1993. (Cité page 3.)
- A. Drogoul. *Systèmes multi-agents situés*. Thèse d'Habilitation à Diriger des Recherches, Université Paris 6, 2000. (Cité page 60.)
- A. Drogoul et J.-A. Meyer, éditeurs. *Actes du colloque Intelligence Artificielle Située*, Paris, 1999. Hermès. (Cité page 72.)
- A. Drogoul et D. Servat. Intelligence diffuse : vers un monde fait d'agents ? Dans A. El Fallah Seghrouchni et L. Magnin, éditeur, *Actes des JFIAD-SMA'01*, pages 227–238, Paris, 2001. Hermès. (Cité page 73.)
- R. Duboz, D. Vermisse, M. Travers, E. Ramat, et Shin Y.-J. Application of an evolutionary algorithm to the inverse parameter estimation of an individual-based model. *Ecological modelling*, 221 :840–849, 2010. (Cité page 50.)
- R. Durrett et S. Levin. The importance of being discrete (and spatial). *Theoretical population biology*, 46 :363–394, 1994. (Cité page 46.)
- A. Dutot, F. Guinand, D. Olivier, et Y. Pigné. GraphStream : A Tool for bridging the gap between Complex Systems and Dynamic Graphs. Dans *Proceedings of EPNACS'2007, satellite workshop of ECCS'07*, 2007. (Cité page 56.)
- E-Cell. Site Web. <http://www.e-cell.org/ecell/>. (Cité page 60.)
- M. T. ESCRIG et F. Toledo. *Qualitative Spatial Reasoning : Theory and Practice*. IOS Press, Amsterdam, Pays-Bas, december 1998. (Cité page 88.)
- A. Eudier. *L'art et la contrainte*. La chèvre aux épices, 2006. (Cité page 8.)
- M. Fehler, F. Klügl, et F. Puppe. Techniques for Analysis and Calibration of Multi-agent Simulations. Dans Marie Pierre Gleizes, Andrea Omicini, et Franco Zambonelli, éditeurs, *ESAW*, volume 3451 de *LNCS*, pages 305–321. Springer, 2004. (Cité page 50.)
- M. Fehler, F. Klügl, et F. Puppe. Approaches for resolving the dilemma between model structure refinement and parameter calibration in agent-based simulations. Dans Hideyuki Nakashima, Michael P. Wellman, Gerhard Weiss, et Peter Stone, éditeurs, *AAMAS*, pages 120–122. ACM, 2006. (Cité page 50.)
- N. Ferry, S. Lavirotte, J.-Y. Tigli, G. Rey, et M. Riveill. Toward a Behavioral Decomposition for Context-Awareness and Continuity of Services. Dans *Ambient intelligence and future trends-International symposium on ambient intelligence (ISAMI 2010)*, volume 72 de *Advances in Soft Computing*, pages 52–62, 2010. (Cité page 81.)

- G. W. Flake, S. Lawrence, C. L. Giles, et F. M. Coetzee. Self-Organization and Identification of Web Communities. *IEEE Computer*, 35 :66–71, 2002. (Cité page 56.)
- F. Forest. *De l'art vidéo au Net Art*. L'Harmattan, Paris, 2004. (Cité page 72.)
- A. G. Ganek et T. A. Corbi. The dawning of the autonomic computing era. *IBM Systems Journal*, 42 :5–18, 2003. (Cité page 81.)
- H. Gardner. *Multiple Intelligences : The Theory in Practice*. Basic Books, Cambridge, MA, U.S.A., March 1993. (Cité page 88.)
- N. Gaud, S. Galland, F. Gechter, V. Hilaire, et A. Koukam. Holonic multilevel simulation of complex systems : Application to real-time pedestrians simulation in virtual urban environment. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 16(10) :1659–1676, 2008. (Cité page 62.)
- S. Gebhardt et R. von Georgi. Music, mental disorder and emotional reception behavior. *Music Therapy Today*, VIII, 2007. (Cité page 90.)
- J.-L. Giavitto. Invited Talk : Topological Collections, Transformations and Their Application to the Modeling and the Simulation of Dynamical Systems. Dans *RTA*, pages 208–233, 2003. (Cité page 54.)
- J.-L. Giavitto et O. Michel. MGS : a rule-based programming language for complex objects and collections. volume 59 de *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*. Elsevier Science Publishers, 2001. (Cité page 62.)
- J. Gil Quijano, G. Hutzler, et T. Louail. De la cellule biologique à la cellule urbaine : retour sur trois expériences de modélisation multi-échelles à base d'agents. Dans *Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents*, pages 187–198, Paris, 2009. Cépaduès. (Cité pages 31, 36, 61 et 66.)
- J. Gil Quijano, G. Hutzler, et T. Louail. Accroche-toi au niveau, j'enlève l'échelle - éléments d'analyse des aspects multi-niveaux dans la simulation à base d'agents. *Revue d'Intelligence Artificielle*, 2010. à paraître. (Cité pages 31, 36, 61 et 66.)
- J. Gil-Quijano, M. Piron, et A. Drogoul. Mechanisms of automated formation and evolution of social-groups : A multi-agent system to model the intra-urban mobilities of Bogotá city. Dans *Social Simulation : Technologies, Advances and New Discoveries*, Chapitre 12, pages 151–168. Idea Group Inc., 2007. (Cité page 62.)
- J. Gips et G. Stiny. Artificial Intelligence and Aesthetics. Dans *Advanced Papers of IJCAI'75*, pages 907–911. Morgan-Kaufmann, 1975. (Cité page 72.)
- C. Godin et Y. Caraglio. A multiscale model of plant topological structures. *Journal of Theoretical Biology*, pages 1–46, 1998. (Cité page 62.)
- D. S. Goodsell. *The machinery of life*. Springer, 2nd édition, 2009. (Cité page 46.)

- Z. Guo, P. M. A. Sloot, et J. C. Tay. A hybrid agent-based approach for modeling microbiological systems. *Journal of Theoretical Biology*, 255 : 163–175, 2008. (Cité page 62.)
- A. Herbon, A. Oehme, et E. Zentsch. Emotions in Ambient Intelligence - An Experiment on How to Measure Affective States. Dans *Emotions in HCI Workshop at HCI 2006 : Engage!*, 2006. (Cité page 90.)
- C. A. R. Hoare. *Communicating Sequential Processes*. Prentice Hall, 1989. (Cité page 77.)
- D. Hofstadter. *Fluid Concepts and Creative Analogies - Computer Models of the Fundamental Mechanisms of Thought*. BasicBooks, New-York, NY, U.S.A., March 1995. (Cité page 88.)
- P. Horn. Autonomic computing : IBM's perspective on the state of information technology. Technical report, IBM Research, 2001. http://www.research.ibm.com/autonomic/manifesto/autonomic_computing.pdf. (Cité pages 73, 81 et 85.)
- G. Hutzler. Le Jardin des Hasards - L'émergence du sens : un parallèle entre peinture abstraite et IAD réactive. Mémoire du DEA IARFA, Université Paris 6, 1995. (Cité page 17.)
- G. Hutzler. *Du Jardin des Hasards aux Jardins de Données : une approche artistique et multi-agent des interfaces homme / systèmes complexes*. Thèse de doctorat, Université Paris 6, 2000. (Cité page 17.)
- G. Hutzler. Cellular automata and agent-based approaches for the modelling and simulation of biological systems : application to the lambda phage. Dans *Tutorials of the Spring School on Modelling Complex Biological Systems in the Context of Genomics*, 2007. (Cité page 27.)
- G. Hutzler. Agent-based modelling of a simple genetic switch. Dans *Tutorials of the Spring School on Modelling Complex Biological Systems in the Context of Genomics*, 2009. (Cité page 27.)
- G. Hutzler et B. Gortais. From Computer Art to Ambient Displays. *Machine Graphics and Vision*, 13 :181–191, 2004. (Cité page 17.)
- G. Hutzler, B. Gortais, et A. Drogoul. The Garden of Chances : a Visual Ecosystem. *Leonardo*, 33 :101–106, April 2000. (Cité pages 13 et 17.)
- G. Hutzler, B. Gortais, P. Joly, Y. Orlarey, et J.-D. Zucker. J'ai dansé avec machine ou comment repenser les rapports entre l'homme et son environnement. Dans *Journées Francophones d'Intelligence Artificielle Distribuée et Systèmes Multi-Agents 2002*, pages 147–150, Paris, 2002. Hermès Science. (Cité page 17.)
- G. Hutzler, B. Gortais, et Y. Orlarey. Mutations : Plastic and Musical Improvisation by Distributed Agents. Dans C. Vergez N. Callaos, X. Zong et J. R. Peleaz, éditeurs, *World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics 2001*, volume X, pages 380–385, Orlando, 2001. IIS. (Cité pages 14 et 17.)

- G. Hutzler, B. Gortais, et V. Renault. Point et ligne sur plan : des agents qui communiquent visuellement. Dans V. Chevrier et C. Brassac J.P. Barthès, éditeur, *Journées Francophones d'Intelligence Artificielle Distribuée et Systèmes Multi-Agents*, pages 191–204, Paris, 1998. Hermès. (Cité page 10.)
- G. Hutzler et H. Klaudel. Méthodes formelles pour les systèmes répartis et coopératifs. Chapitre Systèmes répartis adaptatifs à contraintes de temps, pages 317–343. Hermès Science, Lavoisier, 2006. (Cité page 80.)
- G. Hutzler, H. Klaudel, et D. Y. Wang. Automates temporisés et systèmes multi-agents temps-réel. Dans *Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents 2004*, pages 69–82, Paris, 2004a. Hermès Science. (Cité page 80.)
- G. Hutzler, H. Klaudel, et D. Y. Wang. Designing Adaptive Multi-Agent Systems Using Timed Automata. pages 325–331, 2004b. (Cité page 80.)
- G. Hutzler, H. Klaudel, et D. Y. Wang. Towards Timed Automata and Multi-Agent Systems. Dans W. F. Truszkowski M. G. Hinchey, J. L. Rash, éditeur, *Formal Approaches to Agent Based Systems FAABS'04*, Lecture Notes in Computer Science 3228, pages 161–173, Berlin, 2004c. Springer-Verlag. (Cité page 80.)
- G. Hutzler, H. Klaudel, et D. Y. Wang. Systèmes multi-agents adaptatifs avec contraintes temps-réel : de la spécification formelle à la vérification et à la génération de code. *Technique et Science Informatiques*, 25(3) :317–342, 2006. (Cité page 80.)
- Y. Jiang, J. Pjesivac, C. Cantrell, et J. Freyer. A multiscale model for avascular tumor growth. *Biophysical Journal*, 89 :3873–3883, 2005. (Cité page 62.)
- A. Kak. Spatial Reasoning. *The AI Magazine*, 9 :23, June 1988. (Cité page 88.)
- W. Kandinsky. *Du spirituel dans l'art et dans la peinture en particulier*. Gallimard, Paris, 1989. (Cité pages 9 et 13.)
- W. Kandinsky. *Point et ligne sur plan - contribution à l'analyse des éléments de la peinture*. Gallimard, Paris, 1991. (Cité page 13.)
- P. Klee. *Théorie de l'art moderne*. Denoël, Paris, 1985. (Cité page 13.)
- J. R. Koza. *Genetic programming : on the programming of computers by means of natural selection (complex adaptive systems)*. The MIT Press, 1992. (Cité page 82.)
- C. L. Krumhansl. An exploratory study of musical emotions and psychophysiology. *Can. J. Exp. Psychol.*, 51 :336–352, 1997. (Cité page 91.)
- A. Kubík. Toward a formalization of emergence. *Artificial Life*, 9(1) :41–65, 2003. (Cité page 56.)
- C. Langton. Computation at the edge of chaos : phase transitions and emergent computation. *Physica D*, 42 :12–37, 1990. (Cité page 55.)

- K. G. Larsen, P. Pettersson, et W. Yi. UPPAAL in a Nutshell. *Journal of Software Tools for Technology Transfer*, 1 :134–152, 1998. (Cité page 77.)
- R. S. Lazarus et S. Folkman. *Stress, appraisal and coping*. Springer, New York, 1984. (Cité page 91.)
- V. Le Moal-Joubel. Modélisation à base d'agents du rôle de PAI-1 dans la migration cellulaire et l'échappement métastatique. Mémoire de Master IMBI, Université d'Evry-Val d'Essonne, 2007. (Cité page 27.)
- C. Le Page et P. Cury. How spatial heterogeneity influences population dynamics : simulations in SeaLab. *Adaptive Behavior*, 4 :255–281, 1996. (Cité page 46.)
- R. Leavitt. *Artist and Computer*. Harmony Books, New York, 1976. (Cité page 72.)
- J. Lepagnot. Une approche hybride multiéchelles pour la modélisation et la simulation du rôle de PAI-1 dans la migration cellulaire et l'échappement métastatique. Mémoire de Master MOPS, Université d'Evry-Val d'Essonne, 2008. (Cité page 27.)
- J. Lepagnot et G. Hutzler. A multi-scale agent-based model for the simulation of avascular tumor growth. *Jour. of Biol. Phys. and Chem.*, 9 :17–25, March 2009. (Cité pages 28, 31 et 66.)
- A. Lesne. Robustness : Confronting lessons from physics and biology. *Biological Reviews*, 83 :509–532, 2008. (Cité page 30.)
- A. Lesne. Biologie des systèmes : l'organisation multiéchelle des systèmes vivants. *Medecine Sciences*, 25 :585–587, 2009. (Cité page 61.)
- H. Lieberman. *Your Wish is My Command : Programming by Example*. Morgan Kaufmann, San-Francisco, CA, U.S.A., February 2001. (Cité page 88.)
- T. Louail. De la géométrie des réseaux viaires à l'organisation spatiale intra-urbaine : une approche de la comparaison des formes de villes par la simulation à base d'agents. *Revue Internationale de Géomatique*, 19(4) : 443–469, 2009. (Cité pages 33 et 36.)
- K. Malevitch. *Les arts de la représentation*. Editions l'Age d'Homme, Lausanne, 1994. (Cité page 9.)
- A. Mallavarapu, M. Thomson, B. Ullian, et J. Gunawardena. Programming with models : modularity and abstraction provide powerful capabilities for systems biology. *Journal of the Royal Society*, 6 :257–270, 2009. (Cité page 47.)
- M. Malo, A. Cartier-Michaud, E. Fabre-Guillevin, Hutzler G., F. Delaplace, G. Barlovatz-Meimon, et A. Lesne. When a Collective Outcome Triggers a Rare Individual Event : A Mode of Metastatic Process in a Cell Population. *Mathematical Population Studies*, 17 :136–165, 2010. (Cité page 31.)

- F. Maquerlot, S. Galiacy, M. Malo, C. Guignabert, D. A. Lawrence, M.-P. d'Ortho, et G. Barlovatz-Meimon. Dual Role for Plasminogen Activator Inhibitor Type 1 as Soluble and as Matricellular Regulator of Epithelial Alveolar Cell Wound Healing. *Am. J. Pathol.*, 169 :1624–1632, 2006. (Cité page 28.)
- F. Marc, I. Degirmanciyan-Cartault, et A. El. Fallah-Seghrouchni. Modélisation et synchronisation de plans multi-agents contraints, application aux missions aériennes. Dans *JFSMA 2003*, pages 143–157, Paris, 2003. Hermès-Lavoisier. (Cité page 77.)
- P. Marcenac, R. Courdier, S. Calderoni, et J.-C. Soulié. Towards an Emergence Machine for Complex Systems Simulations. Dans *Proceedings of the 11th International Conference on IEA/AIE, Lecture Notes in Artificial Intelligence*, volume 1416, pages 785–794. Springer, 1998. (Cité page 56.)
- N. Marilleau, C. Cambier, A. Drogoul, E. Perrier, J.L. Chotte, et E. Blanchart. Environnement multi-échelles à base de fractales pour la modélisation agent d'écosystèmes. Dans *JFSMA'08*, 2008. (Cité page 62.)
- H. Martin. *An Introduction to George Brecht's Book of the Tumbler on Fire*. Multhipla, Milan, 1978. (Cité page 7.)
- H. Maturana et F. Varela. *L'arbre de la connaissance*. Addison-Wesley France, Paris, 1994. (Cité page 12.)
- D. Mestivier. Deterministic modeling. Dans *Modeling Complex Systems in the Context of Genomics - Tutorial on Modeling*, pages 15–43, 2007. (Cité page 44.)
- D. Mestivier, P.-Y. Boëlle, K. Pakdaman, A. Richard, J.-P. Comet, G. Hutzler, C. Kuttler, Iartseva A., et F. Képès. Modeling of λ phage genetic switch. Site Web, 2005. <http://shum.huji.ac.il/~sorin/ccs/alex/ecoleThematiqueMontpellier2005.pdf>. (Cité page 23.)
- R. Milner. Calculi for synchrony and asynchrony. *Theoretical Computer Science*, 25, 1983. (Cité page 77.)
- N. Minar, R. Burkhart, C. Langton, , et M. Askenazi. The swarm simulation system : a toolkit for building multi-agent simulations. Rapport Technique RReport 96-06-042, Sante Fe Institute, June 1996. (Cité page 62.)
- M. Mitchell. *Analogy-Making as a Perception*. MIT Press, May 1993. (Cité page 88.)
- T. Moncion. *Modélisation de la complexité et de la dynamique des simulations multi-agents. Application pour l'analyse des phénomènes émergents*. Thèse de doctorat, Université Evry-Val d'Esonne, 2008. (Cité pages 53 et 59.)
- T. Moncion, P. Amar, et G. Hutzler. Automatic characterization of emergent phenomena in complex systems. *Journal of Biological and Physical Chemistry*, 10 :16–23, 2010. (Cité pages 56 et 59.)

- T. Moncion, G. Hutzler, et P. Amar. Detection of emergent phenomena in multi-agent systems. Dans *Proceedings of the Every Spring School on Modelling Complex Biological Systems in the Context of Genomics*, pages 45–49. EDP Sciences, 2007. (Cité page 59.)
- J. Monod. *Le hasard et la nécessité, Essai sur la philosophie naturelle de la biologie moderne*. Seuil, Paris, 1970. (Cité page 7.)
- I. I. Moraru, J. C. Schaff, B. M. Slepchenko, M. L. Blinov, F. Morgan, A. Lakshminarayana, F. Gao, Y. Li, et L. M. Loew. Virtual Cell modeling and simulation software environment. *IET Syst. Biol.*, 2 :352–362, Sep 2008. (Cité page 60.)
- D. J. Musliner, E. H. Durfee, et K. G. Shin. CIRCA : A Cooperative Intelligent Real-Time Control Architecture. *IEEE TSMC*, 23 :1561–1574, 1993. (Cité page 76.)
- D. J. Musliner, R. P. Goldman, et K. D. Krebsbach. Deliberation Scheduling Strategies for Adaptive Mission Planning in Real-Time Environments. Dans *Proc. Third International Workshop on Self Adaptive Software*, 2003. (Cité page 77.)
- M. R. Nami et K. Bertels. A Survey of Autonomic Computing Systems. Dans *ICAS '07 : Proceedings of the Third International Conference on Autonomic and Autonomous Systems*, page 26, Washington, DC, USA, 2007. IEEE Computer Society. (Cité pages 82 et 85.)
- G. Narzisi, V. Mysore, et B. Mishra. Multi-Objective Evolutionary Optimization of Agent-based Models : An Application to Emergency Response Planning. Dans B. Kovalerchuk, éditeur, *The IASTED International Conference on Computational Intelligence (CI 2006)*, 2006. (Cité page 50.)
- J. Nechvatal. *Towards an Immersive Intelligence : Essays on the Work of Art in the Age of Computer Technology and Virtual Reality (1993-2006)*. Edgewise Press, New York, N.Y., 2009. (Cité page 72.)
- N. Negroponte. The Return of the Sunday Painter. Dans M. Dertouzos et J. Moses, éditeurs, *The Computer Age : a Twenty-year View*. MIT Press, Cambridge, 1979. (Cité page 72.)
- D. A. Norman. *The Invisible Computer*. MIT Press, 1998. (Cité page 81.)
- A. Ortony, G. L. Clore, et L. Collins. *The cognitive structure of emotions*. Cambridge University Press, 1988. (Cité page 91.)
- M. Pantic, N. Sebe, J. F. Cohn, et T. Huang. Affective Multimodal Human-Computer Interaction. Dans *ACM Int'l Conf. on Multimedia 2005*, pages 669–676. ACM, November 2005. (Cité page 90.)
- P. Panzarasa, T. Opsahl, et K. M. Carley. Patterns and dynamics of users' behavior and interaction : Network analysis of an online community. *JASIST*, 60(5) :911–932, 2009. (Cité page 56.)
- J. A. Paradiso. Tracking Contact and Free Gesture Across Large Interactive Surfaces. *Communications of the ACM*, 46 :62–68, July 2003. (Cité page 72.)

- M. Parashar et S. Hariri. Autonomic computing : An overview. Dans J.-P. Banâtre et al., éditeur, *Unconventional Programming Paradigms*, LNCS 3566, pages 247–259. Springer Verlag, 2005. (Cité page 82.)
- A. Pentland. Socially aware computation and communication. *IEEE Computer*, 38 :33–40, March 2005. (Cité page 90.)
- R. W. Picard. *Affective Computing*. The MIT Press, Cambridge, MA, USA, 1997. (Cité page 90.)
- A. Pnueli. The temporal logic of programs. Dans *Proceedings of the 18th IEEE Symposium on Foundations of Computer Science*, pages 46–67. IEEE Computer Society, 1977. (Cité page 77.)
- L. Poligny. Architecture décentralisée et auto-organisée sous contrainte temporelle : Application au projet MACHINE. Mémoire de Master MOPS, Université d'Evry-Val d'Essonne, 2006. (Cité page 85.)
- L. Poligny. *De l'ordinateur à la machine : création et régulation du traitement des données*. Thèse de doctorat, Université Evry-Val d'Essonne, 2010. (Cité pages 80 et 85.)
- L. Poligny et G. Hutzler. Autorégulation et adaptation du traitement de flux de données par une architecture multi-agent. Dans *9èmes Rencontres des Jeunes Chercheurs en Intelligence Artificielle*, pages 191–208, Grenoble, 2009. Presses Universitaires de Grenoble. (Cité page 85.)
- M. Prokopenko, F. Boschetti, et A. J. Ryan. An information-theoretic primer on complexity, self-organization, and emergence. *Complexity*, 15(1) : 11–28, 2009. (Cité page 55.)
- P. Prusinkiewicz et A. Lindenmayer. *The algorithmic beauty of plants*. Springer-Verlag, New York, USA, 1990. (Cité page 62.)
- M. Ptashne. *A genetic switch, Lambda Phage and higher organisms*. Cell Press and Blackwell Publishing, Cambridge, MA, 2nd édition, 1992. (Cité page 23.)
- D. Pumain. Pour une théorie évolutive des villes. *L'Espace Géographique*, 2 :119–134, 1997. (Cité page 32.)
- D. Pumain et T. Louail. Interaction des ontologies informatique et géographique pour simuler les dynamiques multiscalaires. Dans *Ontologie et dynamique des systèmes complexes, perspectives interdisciplinaires*, Janvier 2009. <http://www.gemas.fr/dphan/rochebrune09/papiers/PumainDenise.pdf>. (Cité pages 36 et 66.)
- D. Pumain, L. Sanders, A. Bretagnolle, B. Glisse, et H. Mathian. The Future of Urban Systems. Dans D. Lane, D. Pumain, S. Van der Leeuw, et G. West, éditeurs, *Complexity perspectives on innovation and social change*, Methodos Series, Chapitre 12. Springer, 2009. (Cité page 32.)
- P. Quéau. *Metaxu - théorie de l'art intermédiaire*. Champ Vallon, Seyssel, 1989. (Cité page 10.)

- J. C. Raven. *Progressive Matrices Kit*. Harcourt Assessment, San Antonio, TX, U.S.A, janvier 2004. (Cité page 88.)
- V. Renault. *Organisation de sociétés d'agents pour la visualisation d'informations dynamiques*. Thèse de doctorat, Université Paris 6, 2001. (Cité page 17.)
- V. Renault et G. Hutzler. Data Gardens : Agent Societies for the Visualization of Complex Systems. Dans H.R. Arabnia, éditeur, *IC-AI'2000*, pages 167–173. CSREA Press, 2000. (Cité page 17.)
- M. Resnick. LEGO, Logo, and Life. Dans C. Langton, éditeur, *Artificial Life*, pages 397–406. Addison-Wesley Publishing Company, 1988. (Cité page 8.)
- G. Rey. *Contexte en Interaction Homme-Machine : le contexteur*. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier - Grenoble 1, 2005. (Cité page 86.)
- C. W. Reynolds. Flocks, Herds, and Schools : A Distributed Behavioral Model. *Computer Graphics (SIGGRAPH '87 Conference Proceedings)*, 21 (4) :25–34, 1987. (Cité page 58.)
- B. Ribba, T. Colin, et S. Schnell. A multiscale mathematical model of cancer, and its use in analyzing irradiation therapies. *Theoretical Biology and Medical Modelling*, 3, 2006. (Cité page 62.)
- A. Rogers et P. von Tessin. Multi-Objective Calibration for Agent-Based Models. Dans *5th Workshop on Agent-Based Simulation*, 2004. (Cité page 50.)
- E. Ronald, M. Sipper, et M. Capcarrère. Design, observation, surprise ! A test of emergence. *Artificial Life*, 5(3) :225–239, 1999. (Cité page 55.)
- A. Ruivo. Routage de données par colonies de fourmis. Mémoire de recherche, Ecole Nationale Supérieure d'Informatique pour l'Industrie et l'Entreprise, 2007. (Cité page 85.)
- D. M. Russell, N. A. Streitz, et T. Winograd. Building disappearing computers. *Communications of the ACM, The Disappearing Computer (special issue)*, 48 :42–48, 2005. (Cité pages 80 et 81.)
- B. Sallans, A. Pfister, A. Karatzoglou, et G. Dorffner. Simulation and Validation of an Integrated Markets Model. *J. Artificial Societies and Social Simulation*, 6(4), 2003. (Cité page 50.)
- T. Sandholm. Perspectives on multiagent learning. *Artificial Intelligence Journal*, 171 :382–391, 2007. (Cité page 19.)
- A. Sauvageot, M. Léglise, et J.-P. Fourmentraux. Entre l'artiste et l'informaticien : un espace de médiation, traduction, négociation. Rapport technique, Rapport pour le Ministère de la Culture, Délégation aux Arts Plastiques, 2001. (Cité page 8.)
- K. R. Scherer. Emotion, the psychological structure of. Dans N. J. Smelser et P. B. Baltes, éditeurs, *International Encyclopedia of the Social and Behavioral Sciences*. Pergamon, Oxford, 2001. (Cité page 91.)

- D. Servat. *Modélisation de dynamiques de flux par agents. Application aux processus de ruissellement, infiltration et érosion*. PhD thesis, Université Paris 6, November 2000. (Cité page 62.)
- D. Servat, E. Perrier, J.-P. Treuil, et A. Drogoul. Towards Virtual Experiment Laboratories : How Multi-Agent Simulations Can Cope with Multiple Scales of Analysis and Viewpoints. Dans *Virtual Worlds*, pages 205–217, 1998a. (Cité page 56.)
- D. Servat, E. Perrier, J.-P. Treuil, et A. Drogoul. When Agents Emerge from Agents : Introducing Multi-scale Viewpoints in Multi-agent Simulations. Dans *MABS*, pages 183–198, 1998b. (Cité page 56.)
- N. M. Shnerb, Y. Louzoun, E. Bettelheim, et S. Solomon. The importance of being discrete : Life always wins on a surface. *PNAS*, 97 :10322–10324, 2000. (Cité page 46.)
- C. Siléo. *Une approche cognitive de l'adaptativité appliquée à l'automatisation de tâches répétitives*. Thèse de doctorat, Université d'Evry-Val d'Essonne, 2007. Confidentiel. (Cité pages 85 et 86.)
- C. Siléo et G. Hutzler. MATE : un éditeur de texte basé sur une société d'agents réactifs. *Technique et Science Informatique*, 22 :393–397, 2003. (Cité page 89.)
- R. Smallwood et M. Holcombe. The epitheliome project : multiscale agent-based modeling of epithelial cells. Dans *3rd IEEE International Symposium on Biomedical Imaging : Nano to Macro*, pages 816–819, 2006. (Cité page 62.)
- J. Soler, V. Julian, M. Rebollo, C. Carrascosa, et V. Botti. Towards a Real-Time Multi-Agent System Architecture. Dans *1st International workshop on challenges in open agent systems, AAMAS'2002*, 2002. (Cité page 77.)
- C. Sommerer, L. C. Jain, et L. Mignonneau. *The Art and Science of Interface and Interaction Design - vol. 1*, volume 141 de *Studies in Computational Intelligence*. Springer Verlag, Heidelberg, 2008. (Cité page 72.)
- E. Souriau. *Vocabulaire d'esthétique*. PUF, Paris, 1990. (Cité page 9.)
- J. Southern, J. Pitt-Francis, J. Whiteley, D. Stokeley, H. Kobashi, R. Nobes, Y. Kadooka, et D. Gavaghan. Multi-scale computational modelling in biology and physiology. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 96 : 60–89, 2008. (Cité page 61.)
- F. Sparacino, G. Davenport, et A. Pentland. Media in performance : Interactive spaces for dance, theater, circus, and museum exhibits. *IBM Systems Journal*, 39, 2000. (Cité page 72.)
- R. K. Standish. On complexity and emergence. *Complexity International*, 9, 2001. (Cité page 55.)
- D. Stern. *Le monde interpersonnel du nourrisson*. PUF, ed. Le fil rouge, 1989. Alan Lazard et Dominique Pérard, trad. (Cité page 91.)

- P. Stevens. *Les formes dans la nature*. Seuil, Paris, 1978. (Cité page 8.)
- W. R. Sutherland. *The On-line Graphical Specification of Computer Procedures*. Phd dissertation, MIT, 1966. (Cité page 82.)
- K. Takahashi, K. Kaizu, B. Hu, et M. Tomita. A multi-algorithm, multi-timescale method for cell simulation. *Bioinformatics*, 20 :538–546, 2004. (Cité page 60.)
- M. Thellier, G. Legent, V. Norris, C. Baron, et C. Ripoll. Introduction to the concept of functioning-dependent structures in living cells. *Comptes Rendus Biologies*, 327 :1017–1024, 2004. (Cité page 82.)
- J.-P. Treuil, A. Drogoul, et J.-D. Zucker. *Modélisation et simulation à base d'agents*. Dunod, 2008. (Cité page 61.)
- P. Valente, A. Pereira, et L. P. Reis. Calibration Agent for Ecological Simulations : A Metaheuristic Approach. Dans A. A. Sousa et E. Oliveira, éditeurs, *Proceedings of DSIE 2008 - Doctoral Symposium on Informatics Engineering*, pages 64–75, Porto, Portugal, 2008. FEUP Edições, Coleção Colectâneas. (Cité page 50.)
- V. Vallurupalli et C. Purdy. Agent-based modeling and simulation of biomolecular reactions. *Scalable Computing : Practice and Experience*, 8 :185–196, 2007. (Cité page 27.)
- M. Vallée. *Un intergiciel multi-agent pour la composition flexible d'application en intelligence ambiante*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2009. (Cité page 82.)
- H. Van Dyke Parunak, R. Savit, et R. L. Riolo. Agent based modeling vs equation based modeling : a case study and user's guide. Dans R. Conte J. Sichman et N. Gilbert, éditeurs, *Proceedings of Multi-agent systems and agent based simulation*, LNAI 1534, pages 10–25, Berlin, 1998. Springer-Verlag. (Cité page 46.)
- Virtual-Cell. Site Web. <http://www.nrcam.uchc.edu/>. (Cité page 60.)
- V. Volterra. Variations and fluctuations of the number of individuals in animal species living together. *Animal Ecology*, pages 409–448, 1931. (Cité pages 13 et 14.)
- D. Y. Wang. *Systèmes multi-agents adaptatifs avec contraintes temps-réel : de la spécification formelle à la vérification et à la génération de code*. Thèse de doctorat, Université Evry-Val d'Essonne, 2005. (Cité pages 75 et 80.)
- M. Weiser. Some Computer Science Problems in Ubiquitous Computing. *Communications of the ACM*, pages 137–143, July 1993. (Cité page 81.)
- A. Wilden. *Système et structure. Essais sur la communication et l'échange*. Boréal Express, Montréal, 1983. (Cité page 7.)
- U. Wilensky, 1999. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL. (Cité pages 18, 24, 50, 52 et 92.)

- V. F. Wolfe, L. C. DiPippo, G. Cooper, R. Johnston, P. Kortman, et B. M. Thuraisingham. Real-Time CORBA. *IEEE TPDS*, 11 :1073–1089, October 2000. (Cité page 76.)
- S. Wolfram. Emerging Syntheses in Science. Dans *Proceedings of the Founding Workshops of the Santa Fe Institute*, pages 183–189. Addison-Wesley, 1988. (Cité page 45.)
- D. Yamins. Towards a Theory of “Local to Global” in Distributed Multi-Agent Systems (I). Dans *AAMAS*, pages 183–190, 2005a. (Cité page 56.)
- D. Yamins. Towards a Theory of “Local to Global” in Distributed Multi-Agent Systems (II). Dans *AAMAS*, pages 191–198, 2005b. (Cité page 56.)
- L. Zbikowski. Music, Emotion, Analysis, 2010. under review, http://humanities.uchicago.edu/faculty/zbikowski/pdfs/Zbikowski_Music_emotion_analysis_draft.pdf. (Cité page 91.)
- M. Zentner, D. Grandjean, et K. R. Scherer. Emotions Evoked by the Sound of Music : Differentiation, Classification, and Measurement. *Emotion*, 8 : 494–521, 2008. (Cité page 90.)
- L. Zhang, C. A. Athale, et T. S. Deisboeck. Development of a three-dimensional multiscale agent-based tumor model : Simulating gene-protein interaction profiles, cell phenotypes and multicellular patterns in brain cancer. *Journal of Theoretical Biology*, 244 :96–107, 2007. (Cité page 62.)

Titre Le Has(Art) et la néce(Cité) - Une approche (auto-)poiétique des systèmes complexes

Résumé Les systèmes complexes, naturels et artificiels, ont reçu récemment une attention renouvelée : les systèmes naturels, notamment biologiques, du fait de la nécessité de les appréhender dans une démarche systémique ; les systèmes artificiels, du fait de la dématérialisation de l'ordinateur amorcée avec l'informatique ubiquitaire. L'art, de son côté, explore depuis toujours le détournement des dernières avancées scientifiques et technologiques pour la création d'œuvres singulières. Le travail mené depuis dix ans se situe à la croisée de ces chemins, dans le cadre unificateur des systèmes multi-agents. Je me suis intéressé plus particulièrement à l'interaction homme-machine dans le contexte de l'informatique ambiante, dans l'idée d'une construction automatique et d'une régulation dynamique de systèmes d'interaction. Ce travail est alimenté par la recherche menée dans le cadre de la simulation à base d'agents, aussi bien du point de vue des concepts et outils développés, que du point de vue de l'inspiration tirée des mécanismes d'auto-organisation et de régulation des systèmes étudiés. L'art fournit quant à lui un cadre expérimental original par la mise en scène métaphorique, dans des performances numériques interactives, des situations étudiées.

Mots-clés Systèmes multi-agents, modélisation et simulation, systèmes complexes, interaction homme-machine, informatique ubiquitaire, intelligence ambiante, art numérique

Title Has(Art) and Nece(City) - An (auto-)poietic approach to complex systems

Abstract Complex systems, natural and artificial, have recently gained a renewed interest : natural systems, especially biological ones, because of the necessity to apprehend them in a systemic approach ; artificial systems, because of the disappearance of computers in the context of ubiquitous computing. Art, for its part, has always explored the use of the latest scientific and technological advances for the creation of peculiar works. The work conducted during the last ten years is at the crossing of these ways, in the unifying context of multiagent systems. I have been particularly interested in computer-human interaction in the context of ambient computing, by developing the automatic construction and dynamic regulation of interaction systems. This work is nurtured by the research achieved on agent based simulation, on the basis of developed concepts and tools, as well as the inspiration drawn from the self-organization and regulation mechanisms of the studied systems. Art provides an original experimental framework by the metaphoric staging, in digital interactive performances, of the studied situations.

Keywords Multiagent systems, modelling and simulation, complex systems, computer-human interaction, ubiquitous computing, ambient intelligence, numeric art