



**HAL**  
open science

# Modélisation et Gestion de Flux par Systèmes Multiagents: Application à un système d'aide à la décision en épidémiologie

Alexandre Weber

► **To cite this version:**

Alexandre Weber. Modélisation et Gestion de Flux par Systèmes Multiagents: Application à un système d'aide à la décision en épidémiologie. Modélisation et simulation. Ecole Centrale de Lille, 2007. Français. NNT: . tel-00259941

**HAL Id: tel-00259941**

**<https://theses.hal.science/tel-00259941>**

Submitted on 29 Feb 2008

**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.

N° d'ordre : 57

**ECOLE CENTRALE DE LILLE**

**THESE**

Présentée en vue  
d'obtenir le grade de

**DOCTEUR**

en

Automatique, Informatique Industrielle

par

**Alexandre WEBER**

**DOCTORAT DELIVRE PAR L'ECOLE CENTRALE DE LILLE**

**Modélisation et Gestion de Flux par Systèmes  
Multiagents**

**Application à un Système d'Aide à la Décision en Epidémiologie**

Soutenue le 29 Novembre 2007 devant le jury d'examen :

<b>Président</b>	Pr. DEICAS Eduardo	(ECOPA – Institut Pasteur de Lille)
<b>Rapporteur</b>	Pr. HILL David	(LIMOS – ISIMA)
<b>Rapporteur</b>	Pr. DENEUBOURGH Jean-Louis	(Cenoli – Université de Bruxelles)
<b>Membre</b>	Pr. DEICAS Eduardo	(ECOPA – Institut Pasteur de Lille)
<b>Membre</b>	Dr. HUTZLER Guillaume	(IBISC / LIS – Université d'Evry)
<b>Co-directeur</b>	Dr. KUBIAK Philippe	(LAGIS – Ecole Centrale de Lille)
<b>Co-directeur</b>	Pr. DUPONT Daniel	(ERASM – HEI)
<b>Directeur de thèse</b>	Pr. RAHMANI Ahmed	(LAGIS – Ecole Centrale de Lille)

Thèse préparée dans le Laboratoire d'Automatique, Génie Informatique et Signal (LAGIS, UMR CNRS 8146)

Ecole Doctorale SPI 072 (Lille I, Lille III, Artois, ULCO, UVHC, EC Lille)

A Marion,  
Merci pour ta patience et ton soutien quotidien.

A mes Parents,  
Merci pour m'avoir permis d'arriver jusque là,  
Merci pour tous ces moments de réconfort.

A mes Grands-parents,  
Dont le souvenir m'encourage et me soutient constamment.

## Remerciements

Je remercie le Professeur **Jean-Louis Deneubourg** qui honore de sa présence mon jury de thèse et a accepté d'être rapporteur. Qu'il soit assuré de ma très grande reconnaissance.

Je remercie le Professeur **David Hill** pour avoir accepté d'être rapporteur dans ce jury. Je suis honoré de sa venue sur Lille, ce qui montre l'intérêt qu'il porte à mon travail. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

Je tiens à remercier tout particulièrement le Docteur **Daniel Dupont** de m'avoir permis de réaliser ce travail à ses côtés. Qu'il soit assuré d'avoir toute mon estime et ma sympathie. Il a su m'apporter un soutien permanent tant au niveau moral que scientifique. Tout au long de ces trois années, il a orienté mes recherches aux bons moments en me faisant découvrir de nombreux aspects de l'automatique et en étant toujours des plus disponibles. Pour tout cela et pour la confiance qu'il m'a donnée, je le remercie vivement.

De même, j'aimerais adresser toute ma reconnaissance et ma sympathie au Docteur **Philippe Kubiak** qui a également encadré cette thèse. Il a su m'épauler, me motiver et me soutenir quand cela était nécessaire et de la meilleure des façons. Son regard et son sens critique sur ce travail fut essentiel. Je l'en remercie grandement.

Je remercie le Professeur **Ahmed Rahmani** d'avoir dirigé cette thèse. Je lui suis particulièrement reconnaissant de la liberté qu'il m'a donnée dans l'orientation des recherches et pour la confiance qu'il m'a accordée mais également pour son point de vue critique et pour ces remarques constructives lors de nos réunions.

Je remercie le Professeur **Eduardo Deicas** pour avoir accepté de participer à ce jury de thèse. Merci pour l'intérêt qu'il porte à ce travail et pour m'avoir accueilli à plusieurs reprises et avec toujours autant de bonne humeur au sein d'**ECOPA** (dont je remercie également tous les membres.).

Je remercie le Docteur **Guillaume Hutzler** qui a accepté d'évaluer mon travail en qualité d'examinateur. Qu'il soit assuré de ma profonde reconnaissance pour avoir répondu présent à notre appel aussi rapidement. Je sais que cette rencontre sera des plus fructueuses et j'espère qu'elle se concrétisera dans des travaux communs par la suite.

Je remercie le Professeur **Daniel Jolly** pour avoir accepté de juger mon travail et je suis désolé qu'il ne puisse finalement assister à ma soutenance. Quoiqu'il en soit, j'espère que les relations développées autour des SMA continueront à grandir et donneront lieu à de nombreux projets.

Je remercie les membres du **Laboratoire Environnement & Santé** de la Faculté Libre des Sciences et Technologies de Lille (FLST), à commencer par le Docteur **Anne Follet** (que de temps passé ensemble !), qui a apporté l'expertise et les données nécessaires en biologie et en parasitologie à la réalisation de ce travail. Je tiens également à remercier le Docteur **Benoit Bourel** pour les connaissances en entomologie qu'il a su m'apporter et pour son accueil toujours chaleureux au sein du laboratoire.

Je remercie la **Fondation Norbert Ségard** d'avoir permis la concrétisation de ce travail en ayant financé ma thèse. Plus particulièrement, j'adresse toute ma sympathie à **Olivier Devienne**, administrateur de la fondation, et je le remercie sincèrement pour sa disponibilité et ses conseils.

Je remercie l'école des **Hautes Etudes d'Ingénieur (HEI)** et plus particulièrement l'**Equipe de Recherche en Automatique des Systèmes et Microsystèmes (ERASM)** de m'avoir accueillie dans ses locaux et pour m'avoir fourni les moyens techniques et financiers nécessaires à la réalisation de cette thèse. Que toutes les personnes qui m'ont apporté leur aide ou leur soutien durant mon séjour entre ses murs soient assurées de ma reconnaissance. En particulier, j'aimerais remercier, pour leur convivialité, les membres du département **Timtex** de cette école qui ont permis à ce travail de se dérouler dans la bonne humeur (**Daniel Dupont, Denis Deranton, Daniel Steen, Edith Leleu et Bernard Jaegle**).

Je remercie également l'**Ecole Supérieure des Techniques Industrielles et du Textile (ESTIT)** qui voit diplômé cette année sa dernière promotion. Après une fusion réussie avec HEI, je suis sûr qu'elle restera longtemps présente dans le souvenir de tous ceux qui y sont passés et à travers son association des anciens élèves (l'AAE : merci Marie-Christine !!). Je profite de l'occasion qui m'est donnée pour dire toute la fierté que j'ai eue à suivre les enseignements de ses professeurs et également pour remercier vivement tout le personnel administratif. Merci à **Daniel Dupont, José Nébot, David Dubois, Annabelle Mailfait, Daniel Steen, Denis Deranton, Grant Douglas, Jean Polo, Edith Leleu, Jean-Bernard Avrin, Marie-Christine Robeys, Mme Decotigny, Mr Prieur, Mathieu Flipo, Nathalie et sa maman ainsi qu'Ali Moussa** et tous ceux que j'ai pu oublier (qu'ils m'en excusent...).

Je remercie les membres de la **Faculté Libre des Sciences et Technologies de Lille (FLST)**, et tout particulièrement son doyen, le Professeur **Jean-Charles Cailliez**, de m'avoir intégré à leur équipe avec autant de sympathie et de simplicité. Vous m'avez donné l'opportunité d'aimer donner des cours ; Pour cette expérience irremplaçable, je vous suis particulièrement reconnaissant. Merci également pour l'aide scientifique que certains m'ont apporté lors de ma thèse. Merci à **Anne Follet, Lucie Proeschel, Benoit Bourel, Gregory Boutry, Fabrice Cavillon, Frederic Guilbert, Sophie Chassat, Sophie Da Silva, Bruno Milhau, Gille Tartare, Nathalie Deswarte, Cédric Devigne et tous les autres...**

Je remercie l'équipe **Bond Graph** du **Laboratoire d'Automatique, Génie Informatique et Signal (LAGIS)** de l'**Ecole Centrale de Lille** de m'avoir accueilli en son sein. Plus précisément, j'aimerais remercier le Professeur **Geneviève Dauphin-Tanguy** pour m'avoir intégré chaleureusement au groupe et à ses réunions. Je remercie également **Marie-Françoise Tricot** qui fait un travail remarquable et m'a beaucoup aidé dans mes démarches administratives.

Je remercie l'équipe de projet « **PARASIT** » de l'**Ecole Centrale de Lille** pour le travail qu'ils ont fourni et l'aide précieuse qu'ils m'ont apporté pour la modélisation durant presque deux ans. Merci et bonne continuité à **Yahya Saada, Nouredine Bendya, Rachid Ouigumane, Rachid Bella et Vincent Wenger**.

J'aimerais également souhaiter bon courage et bonne chance à **Damien Charabidzé** et à **Gildas Morvan** pour la suite de leur thèse. Je les remercie de leur gentillesse et des moments passés ensemble en espérant que les coopérations multidisciplinaires de ce groupe de recherche continuent à donner d'aussi bons résultats.

En dernier lieu, je souhaite remercier vivement et des plus sincèrement tous les membres de mon entourage proche. Sans leur soutien et leurs encouragements, cette thèse n'aurait probablement pu voir le jour. Ils se reconnaîtront sans aucun doute, une pensée émue pour :

Petite puce ; Moun et Poup ; les Pascaux and Co ; Didier, Tatie Germaine et toute leur troupe ; Laurent, Meufeu et Milllou ; Ma Poule (T'as déjà trouvé Bugs Bunny sexy quand il s'habillait en fille et qu'il ressemblait à une lapine ?) ; Lulu et Marco (bisous de la part de Crevette et Tartiflette...) ; Nicole, Gauth et l'Chef (Au fait : Sépharade ou Ashkénaze ?) ; SqueuD' en général et Les Fuchsias en particulier (Guinch Power !!) ; Tous les amis Estitiens et en particulier la promo 104 et les Nains (Just call me Doc Dopey the Koala !!).

## Résumé

### **Modélisation et gestion de flux par systèmes multiagents : application à un système d'aide à la décision en épidémiologie**

Le travail présenté se situe dans le champ des systèmes complexes. Certains problèmes complexes ne possèdent pas de solution analytique ou ont une solution trop compliquée pour être mise en œuvre facilement. Les méthodes analytiques traditionnelles se posent soit d'un point de vue global (holiste) soit découpent la complexité en éléments distincts pour représenter le comportement du système par une seule entité (réductionniste). Elles sous-estiment ainsi la complexité des différents niveaux d'organisation du système et leur imbrication. De fait, il est quasiment impossible de prévoir l'évolution de tels systèmes à cause du trop grand nombre d'entités et de leurs interactions.

Une autre approche se base sur la modélisation du comportement de chaque élément participant à cette évolution ainsi que celle de ses interactions avec les autres éléments et avec l'environnement. Lors de ces interactions, différents types de données peuvent être échangés (information, argent, nourriture, virus, etc...). Ces échanges peuvent être vus comme un flux. Le principe est de mettre en relation des entités ayant des caractéristiques simples qui leur permettront d'interagir les unes avec les autres dans un environnement spécifique afin d'obtenir un comportement global de plus haut niveau. Comme nous pouvons l'observer dans certaines sociétés d'animaux dits sociaux, la performance collective émerge des interactions directes ou indirectes entre les individus et l'environnement : elle est le résultat d'un processus d'auto-organisation au cours duquel l'environnement et la collectivité se structurent mutuellement. L'imprévisibilité de l'évolution des systèmes complexes ne permet pas de les caractériser complètement. Par conséquent, pour modéliser et comprendre la circulation de flux dans de tels systèmes, il est nécessaire de se tourner vers la simulation.

Afin de tenir compte des différentes spécifications des systèmes complexes dans leur modélisation, les Systèmes MultiAgents (SMA) représentent une méthode particulièrement appropriée. Il est alors possible de représenter des phénomènes environnementaux comme la conséquence d'interactions d'agents agissant en parallèle, chaque agent étant une entité réactive et autonome.

Notre travail est centré sur l'étude de la gestion des flux dans les systèmes complexes par l'élaboration de Simulation Orientée Agents (SOA). En particulier, nous appliquons cette démarche à l'étude de la circulation d'un parasite (*Cryptosporidium parvum*) dans un écosystème. L'objectif est de mieux comprendre les différents épisodes d'infection auprès de population d'hôtes (animale ou humaine) sous des contraintes spécifiques. Étant donné que ce parasite est particulièrement résistant aux méthodes de désinfection traditionnelles, il est nécessaire de saisir les facteurs prédominants agissant dans la contamination et la propagation du parasite.

A cet effet, les données, recueillies auprès de biologistes, nous ont permis de concevoir un outil d'expérimentation en épidémiologie. Cette SOA permet une exploration des comportements possibles du système où circule *Cryptosporidium* spp.. Ainsi, un ensemble de scénarii a pu être simulé. Les résultats permettent d'évaluer la fiabilité de la modélisation, puis, d'émettre de nouvelles hypothèses concernant la dissémination du parasite.

Dans l'objectif d'apporter aux biologistes un outil d'aide à la décision autonome, nous avons développé un système de niveau supérieur (méta-système) capable de réaliser le monitoring d'une SOA. Ce méta-système, basé sur le concept de métaheuristique, cherche à optimiser le comportement du système en fonction d'une problématique précise en évaluant l'impact de facteurs prédéfinis sur l'évolution de la SOA. Ainsi, il est à même d'interpréter les résultats des simulations pour permettre de faire émerger, par l'auto-génération de scénarii, les causes qui influent sur la propagation du parasite.

Mots clés : *modélisation, systèmes complexes, gestion de flux, systèmes multiagents (SMA), aide à la décision, monitoring, bioinformatique, parasitologie.*

## *Abstract*

### **Modelling and Management of Flow by Multiagent System: application to a decision-support system in epidemiology**

Our work consists in studying complex systems. Some complex problems have no analytical solution or have a too complicated solution to be easily implemented. The traditional analytical methods are declined either from a global point of view (holistic) where the complexity is separated into distinct elements to represent the behaviour of only by only one entity (reductionism). So, the various levels of complexity of the system's organisation and their overlap are underestimated. In fact, the evolution of this type of systems is almost impossible to anticipate because of the important number of present entities and their interactions.

Another approach is based on the modeling of the behavior of each element which participates in this evolution likewise on the modeling of their interactions with the other elements and the environment. During these interactions, different kinds of data can be exchanged (information, money, food, virus, etc...). Each exchange can be interpreted as a flow. The principle is to connect entities which have simple characteristics. This allows them to interact together in a specific environment in order to obtain a general higher level behaviour. As we can observe in social animal societies, the collective performance emerges from these direct or indirect interactions: this is the result of a self-organization process during which the environment and the community structure themselves. The stochastic evolution of such systems does not allow them to be characterized completely. Consequently, to model and understand the circulation of flow in this type of systems, we need to make use of simulation.

In order to take into account the multiple specifications of complex systems in their modeling, Multi-Agent Systems (MAS) represent a particularly suitable method. In this way, environmental phenomena are represented as the consequences of the interaction of agents acting in parallel, each agent being a reactive and autonomous entity.

Our work focuses on the study of flow circulation in complex systems by the development of Agent-Oriented Simulation (AOS). A particular application of this flow management method is to simulate the circulation of a parasite (*Cryptosporidium parvum*) in an ecosystem. The principal objective is to better understand the various episodes of infection within different host populations (animal or human) under specific constraints. Because of the fact that this parasite is particularly resistant to the traditional disinfection methods, it is necessary to enhance the prevalent factors acting in the contamination and the propagation of *C. parvum*.

To this end, the data, received from biologists, enabled us to design a tool of experimentation in epidemiology. This AOS allows the exploration of the system behaviour where *Cryptosporidium* spp. circulates. Thus, different scenarios can be simulated. On the one hand, the software enables us to propose new assumptions on the parasite dissemination, and, on the other hand, the results show the accuracy of our modeling.

With an aim of bringing an autonomous decision support system to the biologists, we developed a system of higher level (meta-system) able to carry out the monitoring of an AOS. This meta-system, based on the concept of metaheuristic, tries to optimize the behavior of the system, according to precise problems, by evaluating the impact of preset factors on the evolution of the AOS. Thus, it is capable to interpret the simulation's results in order to allow causes to emerge which influence the parasite propagation by self-generation of scenarios.

Key words: *modelling, complex systems, management of flow, multiagents systems (MAS), decision support system, monitoring, bioinformatics, parasitology.*

# Table des Matières

<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>19</b>
<i>Chapitre I Outils pour la Modélisation et la Simulation .....</i>	<i>27</i>
I. Système et Modèle : Limites des Méthodes Usuelles .....	27
I.1. Système, Modèle et Simulation .....	27
I.1.1. La Notion de Système .....	27
I.1.2. La Notion de Modèle .....	29
I.1.2.a. Les Limites d'un Modèle .....	29
I.1.2.b. Aperçu Méthodologique .....	31
i. Le Réductionnisme .....	31
ii. Le Holisme .....	32
iii. Synthèse .....	33
I.1.3. Vers une Modélisation par Simulation.....	34
I.2. Les Méthodes de Modélisation.....	35
I.2.1. Modèle Déterministe.....	36
I.2.2. Modèle Stochastique .....	37
I.2.3. Modèle par Simulation .....	39
I.2.3.a. Simulation à Composantes Analytiques .....	39
I.2.3.b. Simulation Purement Discrète.....	40
I.2.4. Synthèse .....	42
II. Systèmes Complexes et Principe de l'Intelligence Artificielle Distribuée .....	44
II.1. Systèmes Complexes et Emergence.....	44
II.1.1. Définition du problème.....	44
II.1.2. L'Exemple des Sociétés Animales .....	45
II.1.2.a. Les Termites.....	46
II.1.2.b. Les Fourmies.....	50
II.1.2.c. Les Abeilles .....	51
II.1.2.d. Les Loups .....	52
II.1.3. Conclusion et Notion d'Emergence.....	53
II.2. Principes de l'Intelligence Artificielle Distribuée, de la Vie Artificielle .....	56
III. Les Systèmes Multiagents : SMA.....	65
III.1. Les agents .....	66
III.2. Les Propriétés des Agents .....	69
III.2.1. La Communication .....	70
III.2.1.a. Le Support .....	71
i. Le Partage d'Informations .....	71
ii. L'Envoi de Messages.....	71
iii. L'Environnement .....	72

III.2.1.b. Le Langage .....	72
III.2.1.c. Les Accointances .....	73
III.2.2. Coopération et Emergence .....	74
III.2.2.a. La Coopération Entraîne... ..	74
III.2.2.b. ... Le Processus d'Emergence.....	76
III.3. Limites des SMA et Simulation Orientée Agent (SOA) .....	77
<b>INTERCALAIRE CH.I → CH.II : DU CONCEPT A L'APPLICATION .....</b>	<b>85</b>
<i>Chapitre II Gestion de Flux par Systèmes Multiagents : Application en Epidémiologie .....</i>	<i>86</i>
I. Echanges dans les Systèmes.....	86
II. Le Problème Epidémiologique.....	91
II.1. <i>Cryptosporidium</i> : Spéciation .....	92
II.2. Epidémiologie de la Cryptosporidiose.....	94
II.2.1. Cycle Biologique de <i>Cryptosporidium</i> sp. ....	94
II.2.2. Aspect Clinique de la Cryptosporidiose .....	97
II.3. Dispersion et Transmission de la Cryptosporidiose .....	98
II.3.1. Les Animaux et la Dispersion de <i>Cryptosporidium</i> .....	99
II.3.2. L'Homme et la Dispersion de <i>Cryptosporidium</i> .....	101
II.4. Transmission .....	103
II.4.1. La Voie Hydrique.....	103
II.4.2. La Voie Alimentaire.....	104
II.4.3. Transmission Inter-Individus.....	104
II.5. Vers une Modélisation du Problème.....	107
III. Modélisation de la Circulation de <i>Cryptosporidium</i> .....	112
III.1. Mise en Situation : l'Environnement de <i>Cryptosporidium</i> .....	112
III.2. Mise en Place des Hypothèses de Travail .....	115
III.3. Définition des Agents .....	118
III.3.1. Les agents « Puits ».....	120
III.3.1.a. Agent Mouche .....	120
III.3.1.b. Agent Bouse .....	122
III.3.1.c. Agent Eau (Abreuvoir) .....	122
III.3.2. Les Agents « Organe de Transformation ».....	123
III.3.2.a. Agent Vache.....	123
i. Détermination du nombre d'oocystes viables infectieux initial .....	123
ii. Détermination du déclenchement de la maladie .....	124
iii. Détermination si la dose ingérée est létale .....	125
iv. Evolution du nombre d'oocystes présent dans l'organisme des bovins.....	125
v. Détermination de la mort de la vache .....	128
vi. Détermination de la guérison de la vache .....	129
III.3.2.b. Agent Veau .....	129
III.4. Définition des Interactions.....	129
III.4.1. L'eau .....	130

III.4.2. Les Bouses.....	132
III.4.3. Les Mouches .....	132
III.4.4. Les Bovins .....	133
IV. Simulation et Validation.....	136
IV.1. Mise en Place des Scenarii.....	137
IV.2. Résultats des Simulations .....	139
IV.2.1. Scénarii A et B.....	139
IV.2.2. Scénario C.....	140
IV.2.3. Scénario D.....	140
IV.2.4. Scénario E .....	141
IV.2.5. Scénario F .....	142
IV.3. Conclusion .....	143
V. Evolutions du Modèle .....	147
V.1. L'Environnement.....	150
V.1.1. Mouche et Reproduction.....	150
V.1.2. Saisonnalité .....	153
V.1.3. Adaptabilité des Paramètres .....	156
V.1.4. Représentation Spatiale .....	159
V.2. L'Organisme des Bovins .....	160
V.3. Aspect Quantitatif du Modèle .....	161
VI. Synthèse : SOA et Gestion de Flux .....	162
<b>INTERCALAIRE CH.II → CH.III : DE LA SIMULATION A L'AIDE A LA DECISION .....</b>	<b>166</b>
<i>Chapitre III Monitoring de Simulation Orientée Agents .....</i>	<i>167</i>
I. Optimisation et Métaheuristique.....	167
I.1. Des SOA.....	167
I.1.1. Notre Démarche Expérimentale .....	168
I.1.2. Les Méthodes Employées .....	169
I.1.3. Les Limites .....	171
I.2. ... Vers l'Aide à la Décision .....	173
I.2.1. La Prise de Décision .....	173
I.2.2. Recherche de la Meilleure Solution .....	175
I.2.3. Les Métaheuristiques.....	176
I.2.3.a. Concepts Associés .....	177
I.2.3.b. Vers le Monitoring de SOA .....	178
II. Application au Monitoring de SOA.....	181
II.1. Méthode : Le Simplexe Séquentiel .....	181
II.1.1. Procédure de Déplacement .....	182
II.1.1.a. Règles de Déplacement .....	182
II.1.1.b. Calcul des Coordonnées .....	189
II.1.1.a. Optimisation de la Recherche de l'Optimum.....	192
II.1.2. Détermination du Simplexe de Départ .....	195

II.1.2.a. Simplexe de Départ Numéro 1 .....	196
II.1.2.b. Simplexe de Départ Numéro 2 .....	198
II.1.2.c. Simplexe de Départ Numéro 3.....	199
II.1.2.d. Comparaison des Trois Simplexes .....	200
II.2. Application au Modèle Epidémiologique .....	200
II.2.1. Situation.....	200
II.2.2. Réalisation .....	203
II.2.2.a. Choix des Facteurs à Optimiser .....	203
II.2.2.b. Simplexe de Départ et Déplacements .....	205
III. Résultats.....	211
III.1. Procédure de Test .....	211
III.1.1. Méta-scenario A.....	212
III.1.2. Méta-Scenario B .....	215
III.1.3. Méta-scenario C.....	220
III.1.4. Méta-scenario D .....	224
III.2. Discussion .....	225
IV. Conclusion et Perspectives .....	229
<b>CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....</b>	<b>232</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>238</b>
<b>GLOSSAIRE .....</b>	<b>258</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>269</b>
ANNEXE 1    EXEMPLE DE « FICHE ACTEUR » UTILISEE POUR LA FORMALISATION DU PROBLEME : CAS DE LA MOUCHE...	269
ANNEXE 2    RESULTATS DES SIMULATIONS, SCENARII A A F .....	272
ANNEXE 3    APERÇU DE L'INTERFACE UTILISATEUR ET DU FORMAT DES RESULTATS .....	278
ANNEXE 4    RESULTATS DES EXPERIENCES, OBTENUS AVEC LE META-SYSTEME.....	280
ANNEXE 5    PUBLICATIONS.....	295

# Index des Illustrations

## Liste des Tableaux

TABLEAU I.1 : LES DEUX TYPES D'AGENTS .....	68
TABLEAU II.1 : HOTES ET SITES D'INFECTION DES ESPECES ETABLIES DE <i>CRYPTOSPORIDIUM</i> (XIAO, FAYER, RYAN, & UPTON, 2004).....	93
TABLEAU II.2 : PREVALENCE DE <i>CRYPTOSPORIDIUM</i> SP. CHEZ DES MAMMIFERES D'ELEVAGE DANS LE MONDE (FOLLET, 2005). ...	100
TABLEAU II.3 : EXEMPLE DE TAUX DE <i>CRYPTOSPORIDIOSE</i> DANS LES PAYS INDUSTRIALISES (FOLLET, 2005).....	103
TABLEAU II.4 : DONNEES SUR LES OOCYSTES DANS L'EAU (FOLLET, 2005) .....	131
TABLEAU II.5 : DONNEES SUR LES OOCYSTES DANS LES MATIERES FECALES (FOLLET, 2005).....	135
TABLEAU II.6 : AGENTS PRESENTS LORS DES SCENARII .....	137
TABLEAU II.7 : COMPARAISON ENTRE SYSTEME ALLAITANT ET SYSTEME LAITIER (FOLLET, 2005) .....	157
TABLEAU III.1 : MATRICE D'EXPERIENCE DU SIMPLEXE DE DEPART N°1 .....	197
TABLEAU III.2 : MATRICE D'EXPERIENCE DU SIMPLEXE DE DEPART N°2 .....	199
TABLEAU III.3 : MATRICE D'EXPERIENCE DU SIMPLEXE DE DEPART N°1 .....	206
TABLEAU III.4 : META-SCENARIO A : AGENTS PRESENTS .....	212
TABLEAU III.5 : META-SCENARIO A : PARAMETRES INDUITS PAR LES COORDONNEES DU SIMPLEXE DE DEPART .....	213
TABLEAU III.6 : META-SCENARIO B1 : AGENTS PRESENTS .....	216
TABLEAU III.7 : META-SCENARIO B2 : AGENTS PRESENTS .....	216
TABLEAU III.8 : META-SCENARIO B : PARAMETRES INDUITS PAR LES COORDONNEES DU SIMPLEXE DE DEPART .....	217
TABLEAU III.9 : META-SCENARIO C : AGENTS PRESENTS .....	220
TABLEAU III.10 : META-SCENARIO C1 : PARAMETRES INDUITS PAR LES COORDONNEES DU SIMPLEXE DE DEPART .....	221
TABLEAU III.11 : META-SCENARIO C2 : PARAMETRES INDUITS PAR LES COORDONNEES DU SIMPLEXE DE DEPART .....	221
TABLEAU III.12 : META-SCENARIO D : AGENTS PRESENTS .....	224
TABLEAU III.13 : META-SCENARIO D : COORDONNEES DU SIMPLEXE DE DEPART .....	224

## Liste des Figures

FIGURE I.1 : SYSTEMES ET SOUS-SYSTEMES .....	28
FIGURE I.2 : FABRICATION DES PROTEINES A PARTIR DU GENOME .....	32
FIGURE I.3 : LE MODELE .....	34
FIGURE I.4 : MODELE DE TRANSMISSION SUSCEPTIBLES, INFESTES, RETABLIS (SIR) .....	37
FIGURE I.5 : TAXONOMIE DES METHODES DE MODELISATION (COQUILLARD & HILL R. C., 1997) .....	42

FIGURE I.6 : AUTO-ORGANISATION ET CONSTRUCTION D'UNE TERMITIERE (BONABEAU & THERAULAZ, 1994).....	48
FIGURE I.7 : CONSTRUCTION DE TERMITIERE EN DOME .....	48
FIGURE I.8 : APPROXIMATION A SEPT ITERATIONS DU TRIANGLE DE SIERPINSKI .....	59
FIGURE I.9 : LE JEU DE LA VIE.....	60
FIGURE I.10 : FONCTIONNEMENT D'UN AGENT .....	67
FIGURE I.11 : LA SIMULATION COMME UNE SUCCESSION DE TACHES (FISHWICK, 1995).....	80
FIGURE I.12 : PROPOSITION METHODOLOGIQUE DE GILBERT ET TROITZCH (GILBERT & TROITZSCH, 1999) .....	81
FIGURE I.13 : CADRE METHODOLOGIQUE « COMPLET » (DROGOU, VANBERGUE, & MEURISSE, 2003).....	83
FIGURE II.1 : CYCLE BIOLOGIQUE DE <i>CRYPTOSPORIDIUM</i> PARVUM D'APRES HEYWORTH MF (HEYWORTH, 1992) .....	95
FIGURE II.2 : PHOTOS DU DEVELOPPEMENT DE <i>CRYPTOSPORIDIUM</i> PARVUM (FOLLET, 2005) .....	96
FIGURE II.3 : DIAGRAMME DES INTERACTIONS DU SYSTEME .....	114
FIGURE II.4 : COMPORTEMENT DU SYSTEME A PARTIR DE L'ÉVOLUTION DES BOVINS LORS D'UNE SIMULATION .....	119
FIGURE II.5 : CYCLE DE REPRODUCTION CHEZ LA MOUCHE (FOLLET, 2005) .....	151
FIGURE II.6 : REPRESENTATION DE L'ÉVOLUTION DE LA TEMPERATURE.....	155
FIGURE II.7 : ÉVOLUTION DU NOMBRE DE TETEEES JOURNALIERES (CONTACT VACHE / VEAU) .....	158
FIGURE III.1 : DEMARCHE EXPERIMENTALE .....	169
FIGURE III.2 : RETROACTION DANS LA DEMARCHE EXPERIMENTALE .....	172
FIGURE III.3 : DEPLACEMENT DU SIMPLEXE : SIMPLEXE DE DEPART .....	182
FIGURE III.4 : DEPLACEMENT DU SIMPLEXE : REGLE I.....	183
FIGURE III.5 : DEPLACEMENT DU SIMPLEXE : CAS PARTICULIER DE LA RELAXATION .....	185
FIGURE III.6 : DEPLACEMENT DU SIMPLEXE : REGLE II.....	185
FIGURE III.7 : DEPLACEMENT DU SIMPLEXE : APPLICATION ALTERNATIVE DES REGLES I ET II.....	186
FIGURE III.8 : DEPLACEMENT DU SIMPLEXE : REGLES IV .....	187
FIGURE III.9 : DEPLACEMENT DU SIMPLEXE : ESPACE A DEUX DIMENSIONS.....	189
FIGURE III.10 : DEPLACEMENT DU SIMPLEXE : ESPACE A TROIS DIMENSIONS .....	190
FIGURE III.11 : OPTIMISATION DU DEPLACEMENT DU SIMPLEXE .....	193
FIGURE III.12 : OPTIMISATION DU DEPLACEMENT DU SIMPLEXE : DILATATION .....	194
FIGURE III.13 : OPTIMISATION DU DEPLACEMENT DU SIMPLEXE : CONTRACTION .....	195
FIGURE III.14 : SIMPLEXE DE DEPART NUMERO 1 .....	196
FIGURE III.15 : SIMPLEXE DE DEPART NUMERO 2 .....	198
FIGURE III.16 : SIMPLEXE DE DEPART NUMERO 3 .....	199
FIGURE III.17 : DEMARCHE POUR LE MONITORING DE SOA.....	201
FIGURE III.18 : DEPLACEMENT DU SIMPLEXE DANS L'ESPACE DES CRITERES D'OPTIMISATION RETENUS.....	204
FIGURE III.19 : ADAPTATION DU SIMPLEXE DE DEPART N°1 .....	207
FIGURE III.20 : OPTIMISATION DU DEPLACEMENT DU SIMPLEXE .....	209

## Liste des Annexes

ANNEXE 1	EXEMPLE DE « FICHE ACTEUR » UTILISEE POUR LA FORMALISATION DU PROBLEME :	
CAS DE LA MOUCHE.....		269
ANNEXE 2	RESULTATS DES SIMULATIONS, SCENARII A A F .....	272
ANNEXE 3	APERÇU DE L'INTERFACE UTILISATEUR ET DU FORMAT DES RESULTATS.....	278
ANNEXE 4	RESULTATS DES EXPERIENCES, OBTENUS AVEC LE META-SYSTEME .....	280
ANNEXE 5	PUBLICATIONS .....	295

# Introduction

---

Le concept de *système* est utilisé dans de nombreux domaines. Ses emplois sont divers. Nous parlerons de système d'équations, de système d'exploitation, de système naturel, de système de base de données, de système de gestion, de système solaire ou encore de système éducatif... De par son usage répandu, il n'est pas aisé de définir de façon unique le mot *système*. Au sens le plus large, nous considérons alors qu'un système est une « *collection d'entités en interaction* ». Il est en effet possible de rencontrer des systèmes statiques dont l'état ne change pas en fonction des interactions internes (minéraux, roches, métaux...). Néanmoins, les systèmes dynamiques, où les interactions donnent lieu à de nombreux changements d'état, restent les plus attrayants.

En matière de *systèmes naturels*, qui regroupent un grand nombre de systèmes dynamiques, il n'existe pas de systèmes « isolés », n'entretenant pas de relation avec le milieu ambiant : un système est composé de plusieurs sous systèmes. Chaque entité entretient des relations avec le reste du système naturel. Cela nous conduit inévitablement à considérer un système avec son environnement.

Dès lors, la complexité des systèmes naturels (particulièrement ceux où le vivant est présent : systèmes biologiques, écologiques, sociaux...) se pose comme un véritable challenge pour l'esprit humain. Nous avons de réelles difficultés à synthétiser une quantité très importante d'événements interactifs afin d'en comprendre les effets. Ces systèmes font partie des *systèmes complexes*. Ils ont pour propriété caractéristique de regrouper un nombre considérable d'entités qui font évoluer et complexifient, par leurs interactions, l'organisation interne de l'intégralité du système.

De fait, il est quasiment impossible de prévoir l'évolution de tels systèmes de par le trop grand nombre d'entités en présence et de leurs interactions. Les méthodes analytiques traditionnelles se posent de deux points de vue complémentaires afin de répondre à ce problème.

D'une part, le point de vue holiste ne retient que des structures ou des dynamiques globales ignorant ainsi en grande partie les phénomènes sous-jacents et leurs interactions. D'autre part, le point de vue réductionniste découpe le problème en composants élémentaires distincts pour ne représenter le comportement que d'une seule entité participant à l'évolution du système.

Ces deux « méthodes » sous-estiment ainsi la complexité des différents niveaux d'organisation existants et leur imbrication. Une solution passe par une modélisation du comportement de chaque élément participant à cette évolution ainsi que leurs interactions avec les autres éléments et avec leur environnement. Lors de ces interactions, différents types de données sont échangés (information, argent, nourriture, virus, etc...). Ces échanges peuvent être vus comme un flux.

Bien que certains modèles analytiques aient prouvé leur utilité, les outils issus de l'Intelligence Artificielle Distribuée (IAD) et de la Vie Artificielle (VA) fournissent une aide importante pour la compréhension des phénomènes complexes. Les Principes que soutiennent ces sciences se basent sur les notions d'interactions et d'émergence que nous retrouvons dans certaines sociétés d'insectes sociaux comme les termites ou les fourmis. La démarche proposée fournit une aide importante pour la compréhension des phénomènes complexes. Ces sciences nous montrent que, pour modéliser de tels systèmes, il est nécessaire de se tourner dans un premier temps vers la simulation.

En effet, d'une manière générale, la simulation présente l'avantage de se dispenser d'une modélisation mathématique ardue du système dans son intégralité, et autorise théoriquement la représentation d'environnement à très grand nombre d'acteurs aux comportements différents. Cette gestion des individus, et de leurs variations physiologiques, permet, selon le libre choix de l'expérimentateur, d'affiner le modèle avec le degré de finesse souhaitable pour approcher au mieux la réalité. La simulation permet une exploration des comportements possibles du système au travers de scénarii qui permettent de tester l'influence de configurations initiales multiples et cela dans un temps limité.

Les systèmes multiagents sont apparus comme un outil idéal pour la réalisation de ce type de simulation. En effet, un système multiagents permet de décrire une société à l'aide de lois comportementales locales. Une simulation basée sur un SMA permet donc de mettre en relation des causes locales (lois comportementales contenues dans l'agent) avec des résultats globaux (observation globale d'un comportement collectif). Il est alors possible de comprendre comment le comportement individuel peut modifier le comportement collectif et quelles en sont les répercussions.

Par conséquent, il n'est plus nécessaire d'avoir une connaissance exhaustive du système ; cela dispense de caractériser entièrement le système et simplifie grandement son analyse. Le principe est de mettre en relation un certain nombre d'entités ayant des caractéristiques simples qui leur permettront d'interagir les unes avec les autres dans un environnement spécifique afin d'obtenir un comportement global de plus haut niveau. La performance collective émerge des interactions directes ou indirectes entre les individus et l'environnement : elle est le résultat d'un processus d'auto-organisation au cours duquel l'environnement et la collectivité se structurent mutuellement.

La méthode et les principes que nous avons utilisés ne sont pas cantonnés au domaine de la biologie et sont applicables à d'autres systèmes. En effet, il existe de nombreux cas où les SMA peuvent apporter un support pour la compréhension, l'analyse, voire même la maîtrise de systèmes où un grand nombre d'entités sont en interaction et où des flux de données transitent entre elles. Sans faire de liste exhaustive, il est par exemple possible de citer le trafic routier ou aérien, la répartition du travail dans les entreprises, le problème de la propagation des maladies nosocomiales dans les hôpitaux ou encore la fluctuation des marchés financiers, etc...

De telles méthodes sont donc applicables dans de multiples domaines et sont particulièrement adaptées à la représentation et à la simulation de systèmes naturels. La compréhension et la maîtrise des écosystèmes sont devenues aujourd'hui l'un des enjeux planétaires. En matière de santé publique, les problèmes liés à la qualité des eaux se situent au premier rang des préoccupations. Parmi les agents pathogènes circulant dans les eaux se trouve un genre émergent : *Cryptosporidium*. Ce protozoaire parasite est susceptible d'entraîner des maladies intestinales graves chez l'homme ou chez les mammifères domestiques, le risque d'infection étant particulièrement important pour les individus immunodéprimés. La contamination a lieu par voie féco-orale. Chez les animaux domestiques, en particulier les animaux de ferme et d'élevage, la cryptosporidiose est une parasitose importante. *Cryptosporidium* est, en effet, considéré comme l'agent infectieux majeur dans le syndrome de diarrhée néonatale des espèces bovines, ovines et caprines, induisant des pertes économiques considérables dans les élevages.

Aujourd'hui, les techniques de biologie moléculaire permettent d'avancer dans la détection et l'identification des différentes espèces de *Cryptosporidium*. Cependant il est aussi nécessaire de progresser dans la compréhension de la circulation du parasite dans les écosystèmes. Pour cela, l'outil informatique joue un rôle complémentaire à la biologie moléculaire pour le traçage de ce pathogène dans l'environnement. La modélisation de la circulation de ce parasite permet de simuler des épisodes d'infection auprès de populations d'hôtes fréquentant un écosystème donné.

L'intérêt d'une telle modélisation est de pouvoir évaluer l'influence de paramètres sur le comportement global d'une population de parasites par la conception d'un outil informatique à partir de données biologiques. Cet outil permet de simuler la circulation du parasite dans un environnement donné et d'étudier les différentes façons dont il pourrait infecter une population d'hôtes.

L'un des objectifs principaux du travail exposé dans ce mémoire est l'application d'une telle modélisation en épidémiologie. Cette approche scientifique peut, dans un second temps, être étendue à l'étude de biotopes prenant en compte la variation des facteurs environnementaux influençant la circulation du parasite et l'établissement éventuel de la parasitose. Dans ce sens, il est important de bien choisir le degré d'abstraction et le niveau de détail de la modélisation en tenant compte des objectifs fixés. En effet, il ne faut pas parasiter le modèle par l'introduction de trop de variables influentes mais il en faut suffisamment pour être en mesure de répondre aux questions posées sur le système. De plus, l'état des connaissances disponibles concernant le système (ou susceptible d'être acquises durant la modélisation) doit être prise en compte dans la modélisation et être en accord avec les objectifs finaux.

Il est donc important de travailler étroitement avec les spécialistes du domaine. Cela demande une collaboration importante entre groupes de recherche aux savoir-faires complémentaires issus de plusieurs domaines. Nous nous sommes notamment associés au Laboratoire E&S (Environnement et Santé) de la Faculté Libre des Sciences et Technologies de Lille (FLST) dont les chercheurs ont apporté les compétences indispensables en biologie et en épidémiologie. L'Institut Pasteur de Lille a également activement contribué à l'obtention des données nécessaires à la réalisation de notre projet. Le développement à proprement dit du travail que nous présentons dans ce mémoire a été assuré essentiellement par deux groupes de recherche : le LAGIS de l'Ecole Centrale de Lille (Laboratoire d'Automatique, Génie Informatique et Signal, UMR CNRS 8146) et l'Equipe de Recherche en Automatique des Systèmes et Microsystèmes de l'école des Hautes Etudes d'Ingénieur (ERASM-HEI).

L'ensemble des données fournies par l'équipe Biologie et par l'étude des documents a permis de réaliser un prototype de simulation informatique de la circulation du parasite dans un écosystème. Cet outil informatique, basé sur le principe des systèmes multiagents, permet de définir l'ensemble des individus de l'écosystème étudié et leurs caractéristiques (notamment leur état de santé, le nombre de parasites qu'ils véhiculent et les lois qui régissent son évolution au sein de chaque agent).

Le principe de fonctionnement des systèmes multiagents est de mettre tous les agents en interaction. L'ensemble de ces interactions a lieu en particulier à l'occasion de contacts entre les agents qui doivent également être définis et modélisés (notamment le nombre de parasites échangés entre acteurs et leur influence sur le comportement de ceux concernés lors du contact). Nous considérons également les interactions avec l'environnement comme l'abreuvement ou l'action humaine. Cet environnement peut lui-même évoluer de par les variations de température, d'humidité ou le passage du jour à la nuit. Toutes ces variations sont autant de facteurs qui influencent les agents et leur évolution au sein du système.

L'ensemble de ces considérations rend parfois l'étude du système modélisé aussi compliquée que celle du système réel. Cela s'ajoutant à la grande diversité des systèmes complexes, nous avons voulu développer un outil de niveau supérieur afin de faciliter leur analyse et leur compréhension. L'évolution que nous proposons a pour but principal d'apporter un outil d'aide à la décision autonome réalisant la supervision du problème. Il s'agit de faire l'analyse du système afin d'acquérir de la connaissance sur son évolution. L'objectif est alors d'extraire les causes d'événements émergents en rétroagissant sur les données initiales de la simulation. Par conséquent, ce méta-système englobe en quelques sortes le SMA de niveau inférieur afin de faire des hypothèses sur l'origine d'une propagation particulière de flux. La validation de ces hypothèses est effectuée et la réaction du modèle est ensuite testée afin d'évaluer la répercussion d'un changement de paramètres au début ou même au cours de la simulation et cela à plusieurs reprises. Le système de monitoring interprète le comportement du système pour permettre de faire émerger les propriétés qui influent sur la propagation du parasite par l'auto-génération de scénarii et analyse les résultats à nouveau afin d'obtenir une résolution pyramidale du problème.

Nous nous sommes appuyés sur des méthodes d'optimisation basées sur les plans d'expériences. Le même scénario est répété plusieurs fois afin d'obtenir pour chaque individus des données récapitulatives de l'état général du système à un moment donné et à partir d'une configuration initiale donnée (Fréquence de nettoyage, contamination de l'eau, nombre de mouches présentes, etc...).

Ces données sont ensuite traitées par des algorithmes afin de déterminer les facteurs prépondérants dans la propagation et la multiplication du parasite. C'est sur ces facteurs que nous agissons de façon à montrer, par la simulation, les causes premières de la dissémination du parasite. Cette manière de procéder permet d'apporter des éléments de réponse concrets quant aux propriétés ou aux aspects du système sur lesquels il faut agir pour répondre à une problématique précise et cela dans un temps de simulation relativement court.

Ainsi, ce mémoire comprend trois sections reprenant la démarche que nous venons d'exposer :

Le Chapitre I introduit les notions de système, de modèle et de simulation vue selon l'approche systémique. Nous développons également les concepts liés à l'étude des systèmes complexes et étudions la démarche et les nombreux avantages que propose l'Intelligence Artificielle Distribuée (IAD) et la Vie Artificielle (VA). Nous exposons ensuite les concepts que les SMA regroupent ainsi que les avantages qu'ils apportent en tant qu'outil d'expérimentation à la représentation de systèmes complexes. Enfin, nous verrons les inconvénients que soulèvent ces techniques dans la réalisation d'une Simulation Orientée Agents (SOA) et l'importance des rôles des acteurs prenant part à cette mise en œuvre.

Ces principes sont ensuite mis en pratique dans la conception d'une SOA dédiée à l'étude des flux générés par la circulation et la propagation des parasites du genre *Cryptosporidium* sp. dans un écosystème. Tout d'abord, nous décrivons le comportement de ce parasite afin de comprendre son fonctionnement, puis, nous détaillons l'élaboration du modèle représentant sa dissémination. Ce modèle est alors validé par l'établissement de scénarii qui nous ont également permis d'apporter des éléments de réponse aux problèmes liés à *Cryptosporidium*.

Dans le troisième et dernier chapitre, nous traitons de l'analyse des systèmes, simulés par les techniques que nous avons évoquées, en présentant les notions liées au monitoring de SOA. Nous montrons l'intérêt d'apporter aux spécialistes du domaine un outil d'aide à la décision pleinement autonome capable de réaliser une exploration de l'évolution du système et des questions qu'elle soulève. Nous étudions par la suite la solution que nous proposons pour réaliser cette supervision par l'établissement d'un méta-système capable de rétroagir sur le système d'origine. Enfin, nous verrons les procédures de tests que nous avons mises en place pour la validation de ce méta-système ainsi que les résultats que nous avons obtenus.

En dernier lieu, nous concluons sur les difficultés et l'intérêt de la mise en place d'un travail pluridisciplinaire comme celui que nous décrivons dans ce mémoire. Nous montrerons également ce que ce travail a apporté aux acteurs des différents domaines ayant pris part à sa mise en place. Puis, nous terminerons en exposant les nombreuses perspectives que ce travail a permis d'envisager.

# Chapitre I Outils pour la Modélisation et la Simulation

## *I. Système et Modèle : Limites des Méthodes Usuelles*

### **I.1. Système, Modèle et Simulation**

#### *I.1.1. La Notion de Système*

Le mot « système » est employé dans de nombreux cas, parfois même, nous l'utilisons sans vraiment prêter attention à son sens réel. Ses emplois sont divers et c'est pour ça qu'il peut paraître polysémique, ambigu voire imprécis. Nous parlons de système d'équations, de système d'exploitation, de système naturel, de système de base de données, de système de gestion, de système solaire ou encore de système éducatif... Mais quelles notions, ce mot, cache-t-il réellement ? Même si nous avons le sentiment de savoir intrinsèquement ce qu'il définit à force de le rencontrer, son utilisation multiple le rend peu évident à définir.

Le concept de *Système* au sens général du terme est une notion qu'il est hasardeux de caractériser tant il peut différer selon son domaine d'application. Coquillard et Hill nous proposent une définition, certes très réduite, mais qui correspond à la plupart des utilisations (Coquillard & Hill R. C., 1997). Ils écrivent qu'un « système est une collection d'objets en interaction ». L'étymologie gréco-latine du mot vient corroborer cette définition. En effet, le mot « système » était utilisé pour exprimer la réunion en un corps de plusieurs choses ou parties, ou encore utilisé comme verbe pour dire combiner, établir ou rassembler.

Nous dirons, et ce sera la définition que nous retiendrons pour cette étude, qu'un système est un assemblage d'éléments reliés entre eux et compris dans un ensemble plus grand (Lesourne, 1976). Généralement, les composants du système sont organisés dans le but de faciliter le flux d'informations, de matière ou d'énergie, etc...

Ces éléments sont les sous-systèmes du premier et répondent à la même définition. De fait, nous sommes en mesure de nous demander si ce système englobant ses sous-systèmes n'est pas lui-même le constituant d'un autre système à une échelle supérieure (Le Moigne, 1990 b).

En 1865, Claude Bernard disait des systèmes qu'ils « ne sont pas dans la nature mais dans l'esprit des Hommes ».

Nous constatons alors qu'un système, en particulier un système naturel, ne fonctionne pas de manière sporadique. Nous ne rencontrons pas en réalité de système cantonné, singulier, « isolé au sens thermodynamique » du terme (Coquillard & Hill R. C., 1997).

Un système regroupe un ensemble de structures cohérentes dont les éléments constitutifs, même détachés de leur contexte, en conservent la référence et restent, la plupart du temps, indispensables à son bon fonctionnement, à son développement, et à sa compréhension (De Rosnay J. , 1995) (Figure I.1).

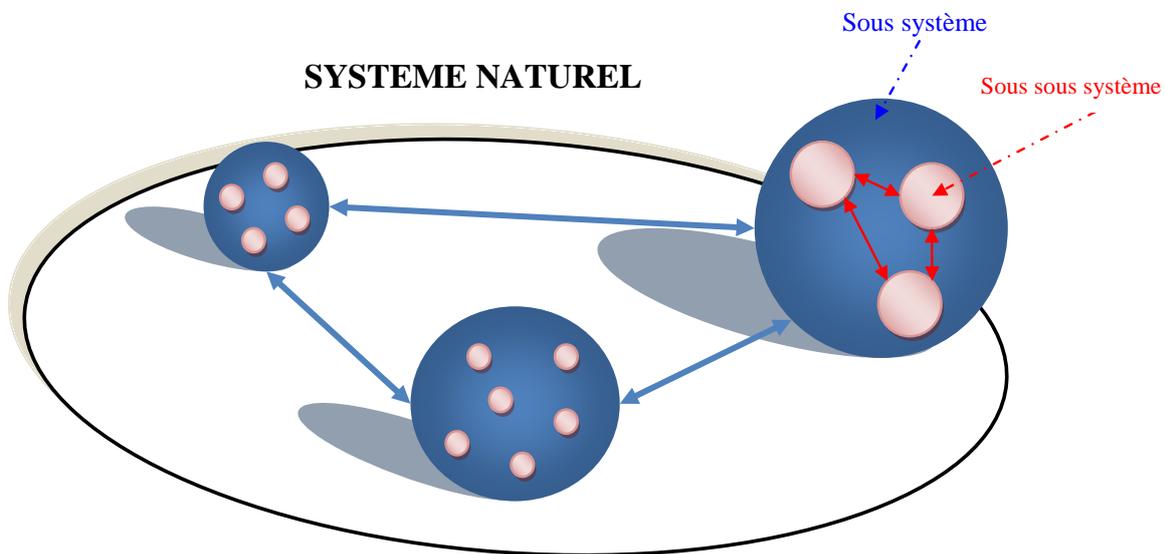


Figure I.1 : Systèmes et sous-systèmes

Un système n'a d'existence que par le regard que nous lui portons, en fonction de notre interprétation du monde. Le système est avant tout un outil conceptuel qui n'existe que par l'usage que nous en faisons (Durand, 2004 9ème édition). Il permet de comprendre la complexité des phénomènes.

De fait, nous symbolisons fréquemment notre environnement en termes de systèmes afin de l'aborder plus simplement, mais il s'agit ensuite d'en apporter une traduction concrète dont le « modèle » est l'expression.

### *1.1.2. La Notion de Modèle*

Si nous nous basons sur la notion de *système* telle que nous venons de l'exposer, nous devons nous demander où nous arrêter dans le choix des éléments à prendre en compte dans la représentation de celui-ci ? En quelques sortes, comment définir ou « séparer » une partie du monde pour en faire un modèle ? Et dans ce cas qu'entendons-nous exactement par « modèle » ?

#### 1.1.2.a. Les Limites d'un Modèle

En effet, un modèle est une représentation de la réalité dont il faut fixer les limites. Il faut non seulement définir quel sera le système de plus grande envergure, celui qui englobe les sous-systèmes et définit leur activité *exogène*, mais il faut également borner la division des systèmes et les règles qui décrivent leur activité *endogène* (Coquillard & Hill R. C., 1997).

Le modèle devient dès lors le résultat de notre incapacité de synthétiser la réalité dans son intégralité tant la quantité de données à combiner serait importante. A contrario, la simplification (par rapport à la réalité) apportée par le modèle n'est pas nécessairement liée à un manque de connaissances de détails ; il peut s'agir d'une volonté délibérée, de la part du modélisateur, de faire abstraction de ces détails qu'il estime non pertinents pour la résolution du problème posé. Prenons l'exemple d'une carte d'état major, qui est un modèle (réduit) de la réalité environnante. Si les critères de précision et de reproduction parfaite de cette réalité devaient être les éléments de choix, la carte d'état major idéale serait une carte à l'échelle 1, sur laquelle figureraient chaque arbre, chaque caillou et chaque brin d'herbe. De fait, si un maximum de détails peut être inclus dans la modélisation, l'utilisateur n'en sera que mieux renseigné. Mais quel serait le réel intérêt de cette carte « parfaite » ? En effet, le problème est qu'elle serait très difficile à exploiter (voire impossible), une carte n'ayant d'autre objet que de donner une vue synthétique des lieux représentés.

Il faut donc trouver un compromis concernant le niveau d'abstraction, c'est-à-dire fixer à quel niveau se trouve l'observateur du modèle et jusqu'à quelle échelle il peut se renseigner, ou, en d'autres termes, quels seront les éléments constitutifs du modèle et pertinents par rapport à l'usage que nous en ferons.

De même, le niveau de détail du modèle doit être déterminé. Cela consiste à spécifier le nombre de paramètres influençant l'état du système et de ses sous-systèmes en fonction des connaissances que nous avons sur le système et sur ses composants. Cette étape est importante et doit être mûrement réfléchie car le niveau d'abstraction comme le niveau de détail doivent être suffisants pour que nous puissions exploiter le modèle. D'autre part, il ne faut pas non plus que ces niveaux soient trop importants : le modèle pourrait « diverger », les incertitudes pourraient s'accroître et donc induire l'observateur en erreur dans ses interprétations.

Un modèle se positionne alors comme une représentation d'éléments simplifiée d'une partie limitée de ce qui existe. Il est donc nécessaire de garder à l'esprit qu'un modèle est une construction intellectuelle d'un ensemble d'objets que nous simplifions pour mieux en appréhender la globalité (et éventuellement la conceptualiser de manière concrète) (Walliser, 1977).

De plus, il n'est utile que s'il provoque la recherche de faits nouveaux qui permettront sa réfutation, la compréhension de son évolution et/ou l'élaboration d'un nouveau modèle (Zeigler, 1976). Le modèle est une image simplifiée, une « abstraction » de la réalité, qui nous sert à comprendre le fonctionnement d'un système en fonction d'une question. C'est à partir de cette question initiale que se pose un problème et ce problème délimite le système à étudier et à modéliser. Le modèle est alors construit comme une hypothèse à partir de la somme des connaissances sur un sujet donné dans l'objectif d'en acquérir davantage.

Il est ensuite important de choisir en connaissance de cause les méthodes qui seront utilisées pour sa réalisation, afin de satisfaire au mieux les objectifs fixés par cette question.

### I.1.2.b. Aperçu Méthodologique

D'une manière générale, les méthodes analytiques se posent de deux points de vue complémentaires afin de répondre aux besoins de la modélisation. D'une part, le point de vue réductionniste et d'autre part le point de vue holiste (Dubois, 2002).

#### *i. Le Réductionnisme*

Nous appelons *réductionnisme* le principe d'explication d'un phénomène complexe par une seule de ses composantes, censée tenir compte, voire résumer, le comportement des autres. Cette définition s'applique notamment au vivant, lorsque les phénomènes de niveau supérieur sont expliqués à partir du niveau inférieur. Avec une approche réductionniste, les propriétés d'un tout doivent se déduire de celles de ses parties : les propriétés d'un moteur doivent se déduire de celles de ses pièces. Bien qu'assez réductrice, cette approche est justifiée au moins en partie : les propriétés d'un moteur ne sauraient être indépendantes de celles des pièces qui le composent (même si la description de chacune d'elle ne suffit pas forcément à définir l'ensemble). Le point de vue réductionniste découpe donc la complexité en composants élémentaires distincts pour ne représenter le comportement que d'une seule entité participant à l'évolution du système (Laughlin, 2005).

Toutefois, un objet complexe, par sa composition et son fonctionnement, est plus qu'une somme de parties plus simples, c'est aussi une structure organisant ces parties (Delattre, 1971). Un exemple de structure organisant un objet complexe est le code génétique (Figure 1.2), qui contient toutes les informations nécessaires à la construction et au fonctionnement des cellules des êtres vivants. Les protéines sont assemblées à partir des acides aminés en fonction de l'information présente dans les gènes.

Leur synthèse se fait en deux étapes :

- La *transcription* où l'ADN codant le gène associé à la protéine est transcrit en ARN messager
- La *traduction* où l'ARN messager est traduit en protéine en fonction du code génétique

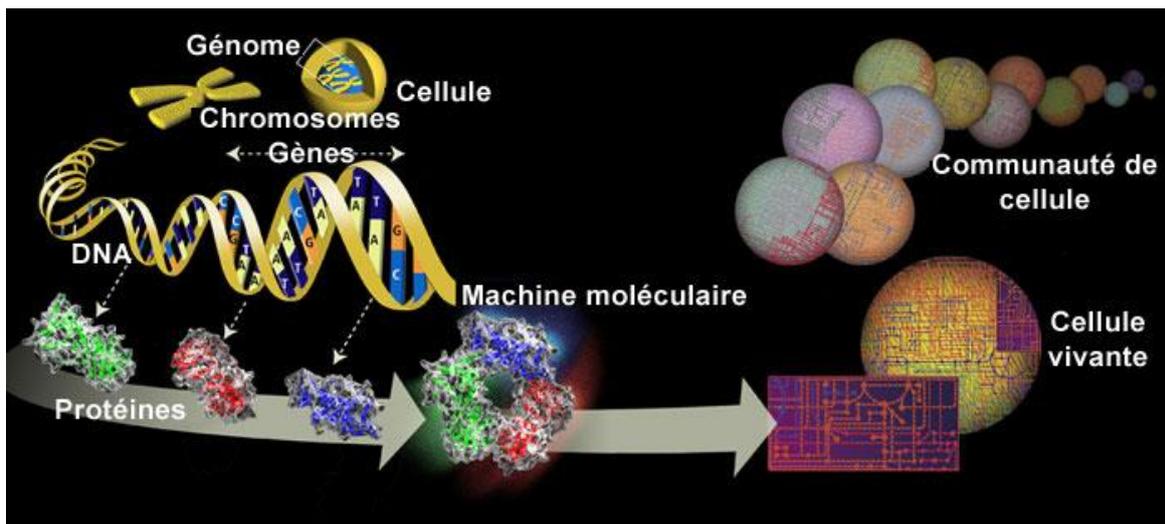


Figure I.2 : Fabrication des Protéines à partir du Génome

Les protéines sont des objets moléculaires dont la description introduit précisément la notion de structures (de façon plus ou moins hiérarchique). La fonction des protéines est conférée par leur structure tridimensionnelle, c'est-à-dire la manière dont les acides aminés sont agencés les uns par rapport aux autres dans l'espace (Tamzalit, 2000).

### ii. *Le Holisme*

Contrairement à la notion de réductionnisme, le *holisme* considère chaque phénomène comme un tout, avec son propre comportement qui ne peut se déduire de ceux de ses parties et ne peut être schématisé par quelques-unes d'entre elles. Une explication holiste est donc l'opposé d'une explication réductionniste, dont elle refuse le caractère détaillé (Polya, 1958). Pour un holiste, l'explication du fonctionnement du cerveau humain, par exemple, ne peut se déduire de l'analyse du fonctionnement de ses neurones.

En somme, la description d'un objet complexe comprend nécessairement celle, *statique*, de sa structure et celle, *dynamique*, des comportements qui en résultent : structure et comportement doivent être ceux de l'objet considéré comme un tout.

Cependant, nous ne pouvons déduire la description d'un objet complexe de celle de ses parties en oubliant sa structure statique et son comportement dynamique d'ensemble. De même, nous ne pouvons expliquer un phénomène local par une structure globale, du fait des interactions entre phénomènes distincts du niveau local. A chaque niveau correspondent des expériences qui mettent en évidence les propriétés de ses parties ; les expériences correspondant à des niveaux différents étant dissemblables, elles conduisent à des représentations originales et à des interprétations distinctes : l'explication d'un phénomène local prend en compte ses interactions avec d'autres phénomènes locaux, interactions sous-jacentes au comportement du phénomène global (Lesourne, 1981 a).

### *iii. Synthèse*

Le point de vue holiste ne retient donc que des structures ou des dynamiques globales ignorant ainsi en grande partie les phénomènes sous-jacents et leurs interactions alors que le point de vue réductionniste décrit le comportement d'un objet écarté de l'évolution du système dans sa globalité et segmente arbitrairement la complexité en éléments disjoints.

Ces considérations peuvent parfois ne pas être suffisantes. Par exemple, lorsque nous étudions le saut d'un sauteur à la corde en filmant son mouvement, nous voyons la totalité de son corps, et non pas l'interaction entre un muscle d'une jambe et les nerfs qui le commandent : ce sont des niveaux différents. Nous ne pouvons décrire et expliquer l'action d'un nerf sur un muscle à partir du seul saut d'un individu, il faut descendre à un niveau physiologique plus bas. Inversement, décrire le mouvement du sauteur à partir du seul mouvement de chacun de ses muscles ignore la structure, les interactions entre muscles et squelette et l'art de sauter acquis à l'entraînement.

### I.1.3. Vers une Modélisation par Simulation

Bien que ces deux manières de procéder (couple holiste/réductionniste) aient prouvé leur utilité et leur efficacité dans de nombreux domaines (Polya, 1958; Coquillard & Hill R. C., 1997; Dubois, 2002), nous remarquons qu'elles sous-estiment la complexité des différents niveaux d'organisation existants et rendent difficilement compte du système dans son intégralité. Afin de pouvoir traduire au mieux l'imbrication entre un système et ses sous systèmes, il peut s'avérer fondamental d'utiliser d'autres méthodes comme la *simulation*. En effet, selon Hill (Hill R. C., 1993) : « La simulation consiste à faire évoluer une abstraction d'un système au cours du temps afin d'aider à comprendre le fonctionnement et le comportement de ce système et à appréhender certaines de ses caractéristiques dynamiques dans l'objectif d'évaluer différentes décisions ».

D'après Hill, les démarches de modélisation et de simulation sont indissolublement liées. Dans le but d'expliquer ce principe, nous appelons *modèle* un élément dont le comportement vis-à-vis d'un phénomène est similaire à celui de l'élément à étudier et *sorties* les éléments que nous voulons étudier. D'autre part, nous désignons par *entrées*, *paramètres* et *contraintes* les éléments dont la variation influe sur le comportement du modèle. La *simulation* est alors l'ensemble constitué d'un modèle, des ordres d'entrée, des paramètres, des contraintes et des résultats obtenus, le tout évoluant dans le temps (Figure I.3).

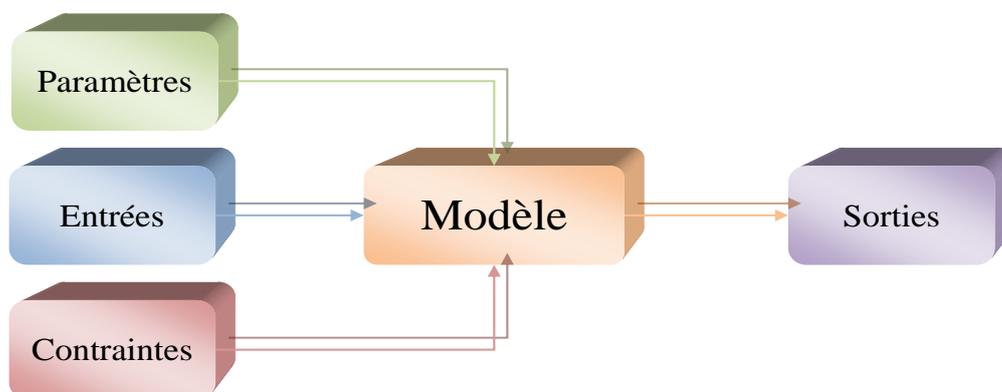


Figure I.3 : Le Modèle

Les entrées sont commandées par l'opérateur, les paramètres sont fixés par l'opérateur et les contraintes dépendent des éléments extérieurs.

La simulation est une reproduction aussi fidèle que possible des conditions réelles d'un environnement, en vue de réaliser des tests de l'évolution de cet environnement. Supposant une modélisation préalable, la simulation doit permettre de percevoir les conditions du déroulement de l'action ainsi modélisée, de même que les caractéristiques de son évolution probable (Gordon, 1978).

## I.2. Les Méthodes de Modélisation

Lorsque nous voulons concrétiser la représentation d'une observation et donc concevoir un modèle, une étape fondamentale réside dans le choix de la méthode de modélisation. Cela est vrai pour tout type de système et particulièrement dans le cas de systèmes naturels, biologiques ou encore dans le cas des écosystèmes pour lesquels un grand nombre de données est à prendre en considération.

De manière générale, plusieurs modèles hiérarchiques de modélisation ayant des caractéristiques différentes sont envisageables (Atlas, 1993; Koopman, Jacquez, & Chicks, 2001). La hiérarchisation de ces modèles permet de se rendre compte des qualités et des limites des différents types de méthodes. En particulier, elle montre les défauts des hypothèses simplificatrices que font les modèles à formalisme mathématique pur dans le cas de systèmes naturels et les avantages que peuvent alors apporter les modèles basés sur la simulation.

Cette classification hiérarchique se situe avant tout dans la façon de définir la « population » d'objets ou d'individus constitutifs du modèle. Il y a une différence fondamentale entre une collection d'entités et un système dans lequel les interactions des individus déterminent ce que va générer le système. Nous distinguons alors les trois classes de modèles suivants :

- *Le modèle déterministe* : Ce modèle est basé sur l'élaboration d'équations précises ; le système est alors totalement prévisible.
- *Le modèle stochastique* : Ce modèle introduit des phénomènes aléatoires ; il rend compte du « hasard » que nous retrouvons communément dans les écosystèmes.

- *Le modèle par simulation* : Il présente généralement l'avantage de se dispenser d'une modélisation mathématique ardue, et autorise la représentation d'environnement comprenant un très grand nombre d'acteurs aux comportements différents. Il représente « le modèle plongé dans le temps ».

A chacun de ces modèles sont associés des méthodes et des outils qui ont apporté bon nombre de solutions à des problèmes de modélisation. Néanmoins, tous les outils ne doivent et ne peuvent pas être employés pour modéliser tous les systèmes. D'autre part, ils doivent être en accord avec ce que nous voulons apprendre sur ce système et avec les objectifs préalablement fixés (Coquillard & Hill R. C., 1997). C'est pour cette raison que la hiérarchisation des modèles est organisée de telle sorte que les modèles de plus haut niveau tendent à se rapprocher du réel en reléguant les hypothèses réductrices dues à l'approximation que font ceux de niveau inférieur.

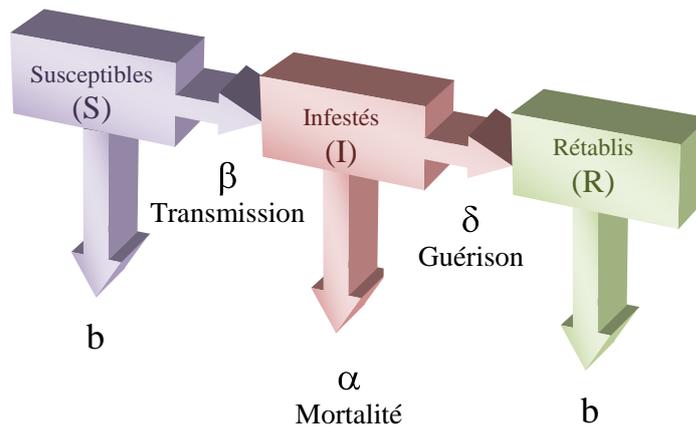
### ***1.2.1. Modèle Déterministe***

Dans le cas du *modèle déterministe*, la population est traitée comme un tas de sable où les grains seraient les individus. Ils sont tous identiques et leur position dans le tas ne change en rien la configuration de ce dernier. Nous ne considérons alors pas d'individus ayant une existence propre. De plus, ces modèles sont généralement continus dans l'espace et dans le temps. Ils ne tiennent pas compte des aspects spatiaux ou des interactions entre les individus du système.

Ces méthodes sont utilisés dans le cadre du couple holiste / réductionniste que nous avons vu au 1.1.2.b de ce chapitre, et bien qu'elles restent relativement simples à implémenter informatiquement, elles traitent le problème de façon trop réductrice ou trop globalisante. Si nous reprenons l'exemple du tas de sable cela reviendrait à limiter l'étude du tas au grain et inversement alors qu'il existe des mécanismes très complexes d'interaction entre les grains de sable.

En effet, un grain supplémentaire peut faire écrouler le tas de sable en faisant naître des avalanches provoquées par les collisions entre les grains.

Un autre exemple se trouve dans les modèles SIR (Susceptibles, Infestés, Rétablis) (Chen, 1988; Chen & Chen, 1993). Cette classe de modèles est la plus utilisée aujourd'hui pour modéliser la transmission des maladies infectieuses. Elle considère l'évolution de la contamination comme le passage entre les trois états définis par son nom (Figure I.4).



**Figure I.4 : Modèle de Transmission Susceptibles, Infestés, Rétablis (SIR)**

Les contacts et les transmissions sont alors remplacés par une probabilité de transmission et un taux de contact comme le préconise ce modèle de transmission établi par les biologistes (Figure I.4). Les résultats obtenus ne sont valables que si la population est élevée ; elle est même considérée le plus souvent comme infinie. Le modèle est basé sur des probabilités de grande échelle qui ne correspondent pas forcément à l'évolution d'une population de taille plus réduite (cas d'un troupeau d'animaux ou d'un service hospitalier par exemple).

### ***1.2.2. Modèle Stochastique***

Le *modèle stochastique* exploite le domaine des probabilités. Ce modèle permet de reléguer la notion de « population infinie » tout en gardant la même définition des individus (Goel & Richter-Dyn, 1974). L'analyse de Markov en est une bonne représentation.

Pour mieux comprendre l'évolution que ce type de modèle propose, nous pouvons faire évoluer le modèle SIR, qui est initialement un modèle déterministe, en un modèle stochastique. Il est alors possible de n'avoir aucun individu infecté alors que le modèle déterministe empêche de telles considérations de par sa nature différentielle. De plus, le nombre d'entités présentes de chaque sorte (S, I ou R) peut être connu. Cependant, il est important de noter que ces entités n'ont pas d'individualité, de caractéristiques propres. Des aspects stochastiques sont également ajoutés : ils permettent d'observer les différentes possibilités d'évolution de l'état de la population. Nous observons cette évolution en fonction du « hasard ».

Ainsi nous pouvons considérer des populations plus restreintes. Par exemple, une configuration regroupant neuf individus susceptibles et un individu infecté est notée  $9S+1I$ . Selon les conditions stochastiques définies dans le modèle, nous aurons au cycle suivant la configuration  $xS+yI+zR$  avec  $x$  compris entre 0 et 9,  $y$  entre 0 et 10 et  $z$  égal à 0 ou 1,  $x$ ,  $y$  et  $z$  étant déterminés selon les règles stochastiques du modèle.

Malgré le fait que ces méthodes soient également relativement simples à implémenter informatiquement (Brown & Rothery, 1993), elles relèvent des probabilités et il est, dans certains cas, difficile de faire une analyse complète du modèle stochastique au bout d'un nombre élevé de cycles.

En effet, les possibilités d'évolution du système sont multipliées à chaque cycle par l'ensemble des évolutions possibles de chaque état potentiel au cycle précédent. De plus, chaque stade d'évolution n'a pas la même probabilité d'occurrence et il faut donc combiner ces probabilités avec celles des évolutions potentielles des cycles précédents. Il est possible d'obtenir rapidement une explosion combinatoire des évolutions admissibles du système (Koopman, Jacquez, & Chicks, 2001).

De plus, le modèle stochastique considère que les individus sont tous identiques. Il est uniquement possible de fixer le nombre d'individus d'un type sans pouvoir définir lesquels sont en interaction à un moment donné ou sont responsables de l'occurrence d'un événement particulier : le fait que l'individu 1 a déjà rencontré l'individu 2 n'est pas pris en compte dans les échanges suivants alors qu'il y a, à priori, une probabilité moindre que cet événement se reproduise rapidement.

### ***1.2.3. Modèle par Simulation***

Les méthodes pour la *modélisation par la simulation* sont scindées en deux grandes catégories (Coquillard & Hill R. C., 1997) : les méthodes de simulation utilisant des *composantes analytiques* (discrètes ou continues) et les méthodes *purement discrètes*.

#### **1.2.3.a. Simulation à Composantes Analytiques**

La simulation à composantes analytiques peut prendre des formes plus ou moins fondamentales. L'une des plus élémentaires est le regroupement de plusieurs modèles analytiques. Ces simulations sont appelées « *modèles théoriques* » et sont à la base des simulations de ce genre. D'une manière générale, les *modèles théoriques* permettent de suppléer à la résolution analytique quand celle-ci est impossible.

Un autre type de modèle à composantes analytiques est le *modèle à compartiments* (Atkins, 1991). Nous appelons compartiment des entités représentées par un ensemble de variables quantitatives qui déterminent de manière globale l'évolution du système. Ces compartiments correspondent à des divisions théoriques et implicites du système. Ils permettent d'exprimer explicitement les flux (de matière ou d'énergie par exemple) qui existent entre eux et qui régissent l'évolution du système. Ces flux peuvent être exprimés au moyen d'équations différentielles. Il est intéressant de remarquer que le modèle présente des divisions explicites du système. Par contre, les flux globaux n'apparaissent pas de manière explicite car ils ne peuvent être connus que par sommation des flux entre entités individuelles.

Une troisième catégorie de simulation à composantes analytiques est le principe des *System Dynamics (SD)* (Palm, 2004; Popp & Schiehlen, 2005). Il s'agit d'une approche assistée par ordinateur à l'analyse et à la compréhension de la structure de base des systèmes. Cette approche emploie des méthodes basées sur l'autorégulation de l'information (effet *feed-back*) et la causalité mutuelle ou récursive pour comprendre la dynamique des systèmes physiques, biologiques, et sociaux complexes. Les modèles SD peuvent être utiles pour montrer rapidement comment l'abstraction d'un système pourrait se comporter et réagir à un changement de paramètres.

### I.2.3.b. Simulation Purement Discrète

La deuxième grande famille de méthodes se basant sur la simulation est celle des *simulations purement discrètes*. Leur élaboration est très variée. Cependant, elles peuvent être regroupées en plusieurs classes auxquelles elles ne sont pas cantonnées. En effet, ce type de simulation est bien souvent hétérogène, hybride et, la plupart du temps, est une combinaison, dans différentes proportions, des techniques dont nous allons voir les principes dans la suite et qui seront plus largement détaillés dans le §II de ce chapitre (Systèmes Complexes et Principe de l'Intelligence Artificielle Distribuée). Leur conception en est rendue délicate mais elles sont aujourd'hui les méthodes les plus puissantes et les plus adaptées à la modélisation de systèmes naturels, particulièrement dans le cas où l'espace et le temps doivent être inclus conjointement.

La *simulation discrète* est une simulation dans laquelle le système est soumis à une succession d'évènements qui le modifient. Ces simulations ont vocation à appliquer des principes simples à des systèmes de grande taille. La simulation discrète se divise en deux catégories (Le Moigne, 1994). La première est la catégorie *asynchrone* (time-slicing) où nous simulons l'ensemble des événements se produisant à chaque unité de temps dans l'intégralité du système. A chaque « cycle », de fréquence variable ou préalablement fixée, l'état du système et de ses sous-systèmes évolue ou non, modifiant de façon globale la perception que l'observateur en a. La seconde est dite *synchrone* (event-sequencing) et se caractérise par le fait que les changements d'états du système simulé (événements) se produisent à des instants (sans durée) répartis de manière discrète sur l'axe des temps. Elle consiste donc à calculer l'arrivée du prochain événement, et à simuler événement par événement, ce qui permet souvent des simulations rapides, bien qu'un peu plus complexes à programmer.

Ces simulations peuvent inclure des phénomènes aléatoires. En effet, il est fréquent que la modélisation d'un système nécessite de prendre en compte des événements discrets fortuits (la mortalité des individus par exemple). Elle peut également contenir des phénomènes trop complexes pour être explicités dans le modèle (choix alimentaire immédiat d'un herbivore, météorologie à l'échelle de la journée, mouvement d'une graine emportée par le vent, etc...).

Le modèle conceptuel requiert alors l'utilisation de lois de probabilité et est qualifié de *stochastique*. Les simulations discrètes dites *stochastiques* tentent de représenter par cette technique la part de hasard foncièrement comprise dans les systèmes naturels.

La stochasticité d'un modèle n'est pas systématiquement liée à la complexité du système modélisé. Il peut être d'une grande complexité, mais être suffisamment bien connu pour que tous les aspects soient pris en compte de manière déterministe (par exemple sous forme d'un système d'équations différentielles non linéaires dont la solution peut éventuellement avoir un comportement chaotique). De même, celui-ci peut être relativement simple à modéliser de façon déterministe mais en interaction avec d'autres systèmes de manière complexes, parfois trop complexes pour être pris en compte de manière explicite dans le modèle (Mélèse, 1990).

La simulation est le plus souvent un mélange de méthodes stochastiques et déterministes. Quoi qu'il en soit, un avantage est que les simulations purement discrètes ne nécessitent pas la conception d'un modèle d'évolution du système dans son intégralité. De fait, il n'est pas obligatoirement implémenté explicitement et peut, par conséquent, servir à mettre en évidence l'évolution de systèmes dont nous ignorons le comportement global, ou, tout au moins qui est susceptible d'apporter davantage d'informations que le processus original.

### 1.2.4. Synthèse

La Figure I.5 (Coquillard & Hill R. C., 1997) résume les techniques de modélisation évoquées plus haut.

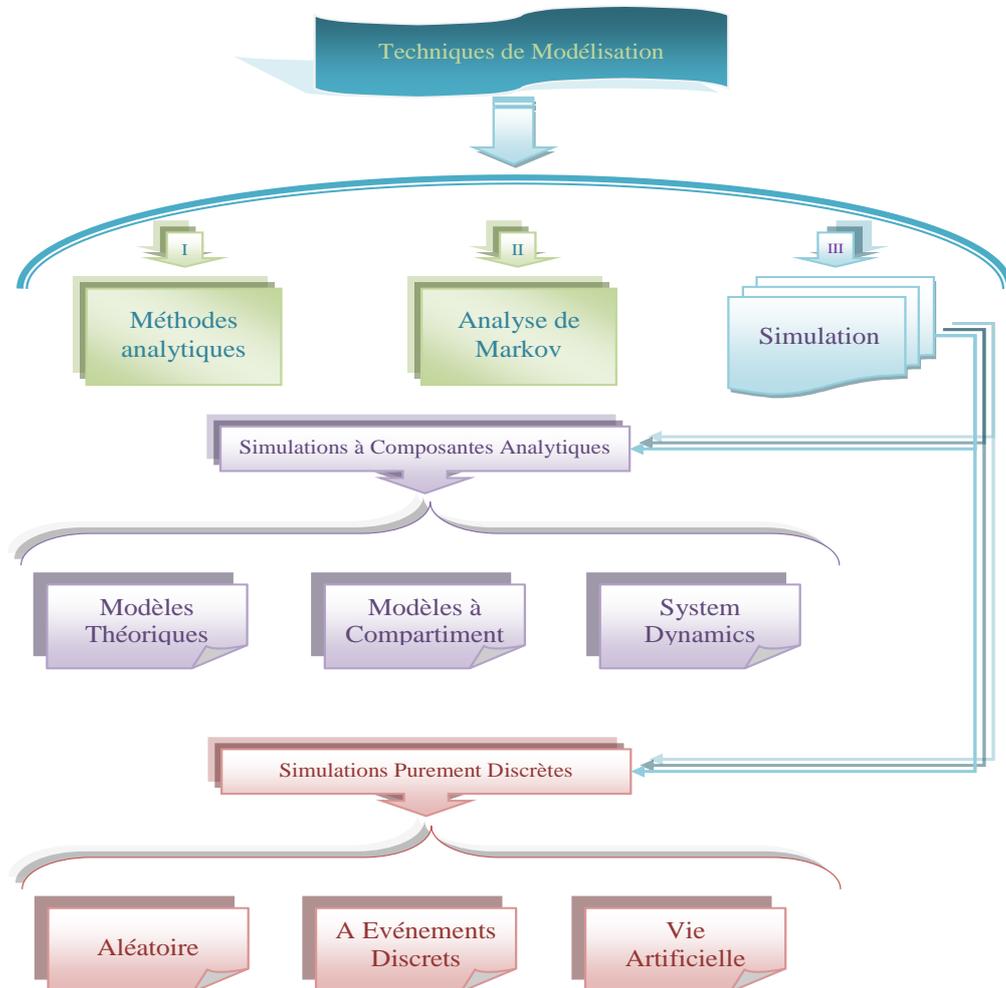


Figure I.5 : Taxonomie des Méthodes de Modélisation (Coquillard & Hill R. C., 1997)

Comme nous l'avons vu dans plusieurs exemples, de nombreux systèmes sont constitués d'un grand nombre d'entités en interaction. La définition même de la notion de système sur laquelle nous nous appuyons en autorise d'ailleurs une infinité.

Nous avons pu voir également que ces systèmes sont particulièrement difficiles à modéliser et qu'il existe de nombreuses méthodes, plus ou moins adaptées à des fins spécifiques, pour les représenter ou les simuler. Les systèmes que nous étudions sont alors qualifiés de *complexes* lorsqu'un observateur ne peut prévoir leur comportement ou leur évolution par un raccourci de calcul ou une représentation mentale simple.

Alors, afin de mieux les comprendre, pour mieux les aborder, le meilleur compromis serait de ne pas devoir choisir entre les concepts holistes et réductionnistes. Une solution serait de définir un compromis pour ne conserver que les avantages de ces deux points de vue. Nous avons remarqué dans ce sens que la modélisation par simulation apporte des éléments de réponse quant à la représentation de tels systèmes. Cela permettrait ainsi une observation conjointe de l'évolution du système et de ses éléments constitutifs.

Dès lors, il paraît important de comprendre ce qu'est un système complexe : Qu'ont de si particulier de tels systèmes pour mériter cette appellation ? Quelles sont leurs caractéristiques et les propriétés qui en découlent ? Comment atteindre le compromis dont nous avons parlé ? Ce sont autant de questions auxquelles nous allons tenter de répondre dans la suite afin de faire un choix efficace dans les outils et la démarche que nous allons adoptés.

## II. Systèmes Complexes et Principe de l'Intelligence Artificielle Distribuée

### II.1. Systèmes Complexes et Emergence

#### II.1.1. Définition du problème

« *Le tout est plus que la somme de ses parties* » (Dilthey).

Nous avons déjà évoqué ce principe dans l'approche systémique développée dans la partie précédente. Souvent utilisée à tort et à travers, cette proposition devient de plus en plus d'actualité à propos de ce qui est appelé *systèmes complexes*. Un système complexe est composé d'un grand nombre d'éléments ou d'entités qui interagissent simultanément. Des molécules qui composent nos cellules jusqu'aux individus et aux machines qui peuplent un espace économique, les systèmes complexes sont omniprésents. Ici, complexe ne signifie pas forcément compliqué. Un système complexe est un système dont les propriétés ne sont pas réductibles à celles de ses parties (Le Moigne, 1990 b). Étymologiquement, *compliqué* (du latin *cum pliare*, empiler avec) signifie qu'il faut du temps et du talent pour comprendre l'objet d'étude ; tandis que *complexe* (du latin *cum plexus*, attaché avec) signifie qu'il y a beaucoup d'enchevêtrements, que « tout est lié » et que nous ne pouvons étudier une petite partie du système de façon isolée. Les systèmes complexes sont généralement compliqués, mais l'inverse n'est pas vrai.

Les propriétés de ces systèmes en apparence totalement différents, si ce n'est qu'ils sont tous formés d'un grand nombre de constituants hétérogènes, sont régies par des lois sous-jacentes identiques. Non sans surprise, nous remarquons également, très souvent, que les propriétés des constituants de ces systèmes sont relativement simples. Autrement dit, le complexe a la possibilité de naître du simple. Il est toutefois difficile de rendre compte de l'origine des propriétés de ces systèmes, puisqu'elles ne sont pas déductibles de celles de leurs constituants.

Comme nous avons pu le voir tout au long du §I, nous comprenons que la méthode la plus adaptée pour la représentation de systèmes complexes est la simulation, voire la reproduction en laboratoire.

Cependant, reproduire ces phénomènes expérimentalement semble compliqué à réaliser car, d'une part, les moyens à mettre en œuvre seraient colossaux dans la plupart des cas, et d'autre part, parce qu'il est fondamentalement impossible de comprendre, au sens classique du terme, comment les propriétés des systèmes complexes émergent. Nous ne pouvons ni nous représenter mentalement la façon dont ces propriétés adviennent ni les déduire d'une ou de plusieurs lois générales. Nous ne pouvons que simuler l'interaction des multiples constituants du système et constater leur apparition.

Parmi les nombreux exemples de systèmes complexes, les plus significatifs sont sans doute ceux constitués d'insectes sociaux. Comprendre leur fonctionnement revient à intégrer les principes de base qui régissent les systèmes complexes et ainsi permet de mieux appréhender leur modélisation.

### *II.1.2. L'Exemple des Sociétés Animales*

De fait, les termites, les fourmis ou encore les abeilles sont tout particulièrement étudiés dans le cadre des systèmes complexes pour leur capacité à générer des comportements de groupe complexes et pour leur caractère dit « social ». Ces insectes sont spécialisés comme le sont aussi parfois des groupes d'animaux tels les loups. Chez tous ces animaux, il existe des castes, des groupes d'individus ayant chacun un objectif précis à réaliser. Ils s'occupent des récoltes, de la surveillance, des réparations ou encore du couvain. Les tâches à réaliser sont divisées en activité spécifique, ce qui rend les acteurs appartenant à l'écosystème interdépendants, acteurs qui, dans certains cas, ne pourraient pas survivre seuls.

Nous pouvons légitimement penser que l'intelligence collective provient de cette division du travail, du fait que la société n'est pas anarchique et que chacun est prémunie d'une activité bien précise. A contrario, nous pouvons avoir tendance à centraliser les choses, et en déduire que, dans les communautés humaines ou animales qui nous entourent, il existe un chef, un coordinateur, une sorte d'entité supérieure qui répartit les rôles et contrôle le bon fonctionnement de la société.

Or, il apparaît naturel que, chez des insectes sociaux comme les fourmis, les termites ou les abeilles, le système cognitif des individus n'est pas assez développé pour pouvoir recueillir et gérer la quantité d'informations nécessaires pour établir, en superviseur, la bonne marche de la société. Effectivement, quoi de plus complexe qu'une fourmilière mais, au contraire, de plus simple qu'une fourmi ? Pourtant ce qui vient spontanément à l'esprit d'un observateur, et qui est troublant, c'est que tout se passe comme s'il existait un individu coordinateur virtuellement présent au centre de la collectivité assurant l'intégration des activités des autres membres du groupe. Une perception globale de la situation est-elle capitale pour détecter et compenser des déviations globales du système ? Comment expliquer l'émergence d'une intelligence, d'une capacité cognitive collective alors que les aptitudes de chaque entité prise individuellement semblent très limitées et répondre d'un schéma simple ?

#### II.1.2.a. Les Termites

En prenant l'exemple des termites (Bonabeau & Theraulaz, 1994), nous allons voir qu'il est possible d'obtenir une structure complexe résultant d'interactions entre individus simples et sans que la structure physique ou organisationnelle ait été pensée au préalable. Les termites construisent des nids d'une extrême complexité, totalement régulés et qui atteignent des tailles impressionnantes. Dans un premier temps, les termites ramassent et mastiquent de la terre pour confectionner des boulettes. Cette action est leur seul but, elle n'est pas réfléchie, il s'agit en quelque sorte d'un réflexe. Le termite pose ensuite cette boulette aléatoirement quand sa confection est achevée. La salive qu'il y a laissée contient des phéromones. C'est par cette substance que les réactions des termites de la colonie sont influencées. Elle représente le stimulus.

La perception de ce stimulus par les autres termites est définie par un gradient de phéromone qui va diminuer en fonction de la distance à cette boulette. La détection, par un autre animal, de ces phéromones, s'il passe à proximité de la boulette fraîchement déposée, déclenche chez lui l'activité bâtisseuse (Figure I.6). Si cet autre individu fabrique déjà une boulette, il la déposera inconsciemment au dessus de la première. Plusieurs tas sont alors construits et progressivement l'activité se polarise sur les plus gros d'entre eux. Au fur et à mesure du temps, le tas de boulettes se transforme en un pilier qui grandit graduellement. D'autre part, de plus en plus d'individus participent à la construction étant donné que le gradient de phéromone prend de plus en plus d'importance.

L'activité de construction est alors déclenchée chez les individus jusque là inactifs par l'état d'avancement du chantier qui provoque un stimulus spécifique. Il s'agit en fait d'une sorte d'autocatalyse. Plusieurs piliers voisins sont ainsi construits jusqu'à une hauteur critique où les gradients de deux piliers proches se rejoignent et créent un nouveau stimulus (Figure I.6). Ce dernier amène les termites à concevoir une arche pour rapprocher ces deux piliers car, une fois arrivés au sommet, ils sont attirés autant par le gradient de l'un que par celui de l'autre.

Une fois que plusieurs arches voisines sont construites, le même effet de rapprochement de gradients pousse les termites à la construction d'un dôme au dessus de ces arches. Puis, le dôme devenant plat, le cycle de construction recommence et les termites posent des boulettes aléatoirement à sa surface pour entamer un nouvel étage de la termitière. Ainsi, ils fabriquent plusieurs étages de chambres totalement régulées et où peut évoluer une colonie sans qu'aucun d'entre eux ne se soit positionné comme l'architecte de cette réalisation ; aucun ne pense, à l'avance, à la structure des dômes ou à l'organisation nécessaire à leur construction.

La Figure I.6 tirée de (Bonabeau & Theraulaz, 1994) schématise ce principe de construction en reprenant les différentes étapes que nous venons de détailler.

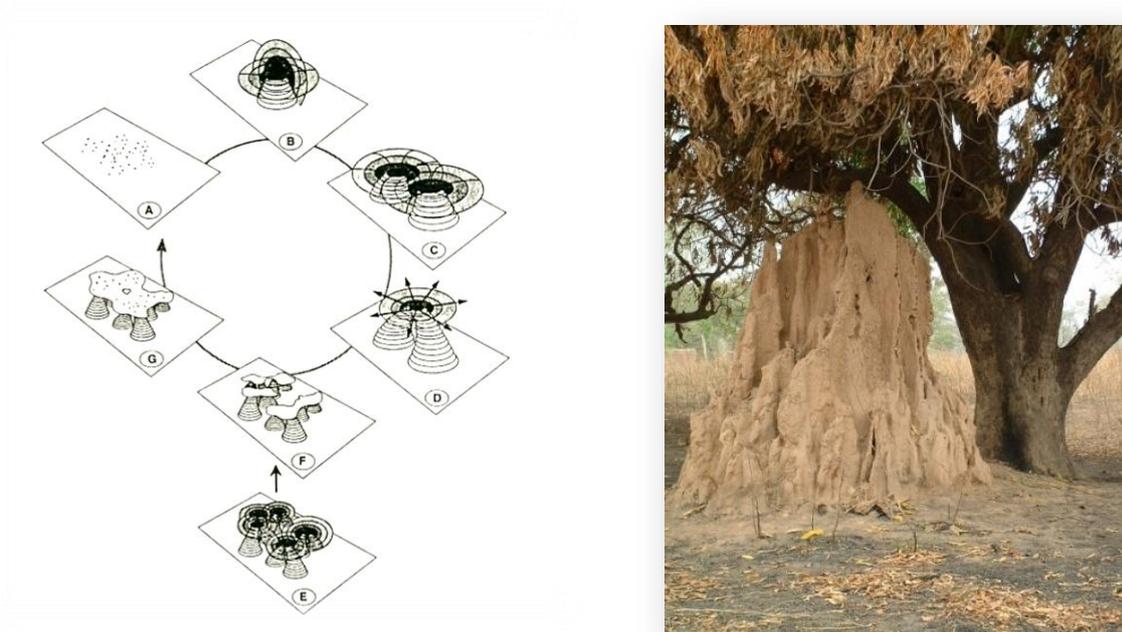


Figure I.6 : Auto-organisation et Construction d'une Termitière (Bonabeau & Theraulaz, 1994)

L'activité bâtisseuse peut également être déclenchée par la présence d'une reine à proximité. La construction prend alors une forme plus régulière en forme de dôme (Figure I.7).

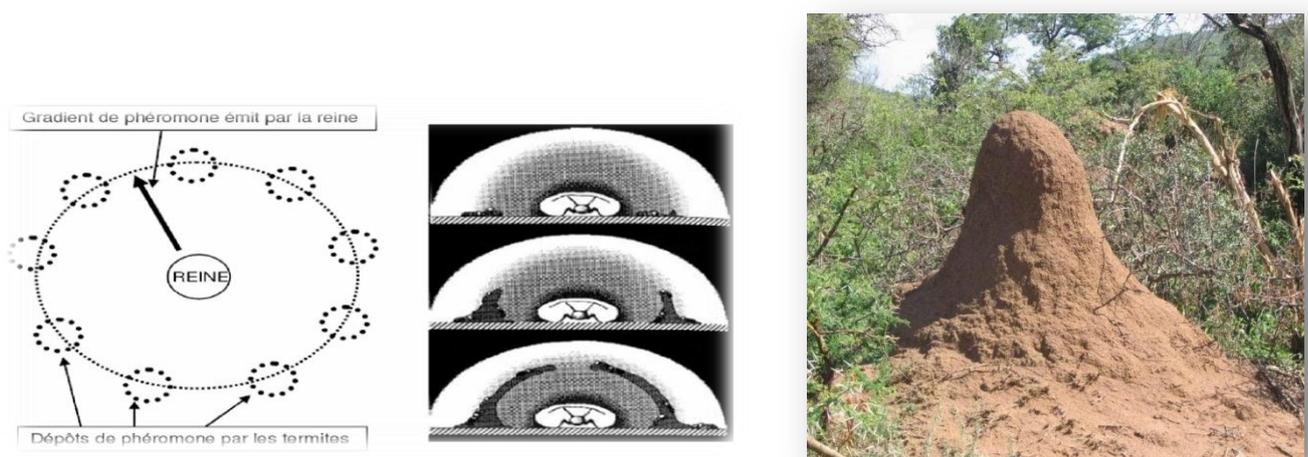


Figure I.7 : Construction de Termitière en Dôme

Pierre-Paul Grassé, qui a longuement étudié ces insectes, résume ce principe en nous disant (Grassé, 1960) que « *la coordination des tâches, la régulation des constructions ne dépendent pas directement des ouvriers, mais des constructions elles-mêmes. L'ouvrier ne dirige pas son travail, il est guidé par lui* ». Il appela ce processus « stigmergie » dont la racine latine signifie « œuvre stimulante ». Eric Bonabeau et Guy Theraulaz commentent ces dires (Bonabeau & Theraulaz, 1994) en posant que « *dans la stigmergie, chaque ouvrier de par son travail qui apparaît donc comme une réponse automatique à un certain stimulus significatif, crée une nouvelle stimulation laquelle agira sur lui ou sur un quelconque congénère. Chez les termites nous voyons donc que la construction ordonne, par elle-même, les réactions des sujets et aboutit, par la voie de l'automatisme et de la plus totale inconscience individuelle, à une œuvre parfaitement cohérente, donnant l'illusion de répondre à un plan défini* ».

La notion d'auto-organisation ou d'effet feed-back que nous avons déjà abordée semble ici d'une importance capitale. De toute évidence, elle est fondamentale pour la compréhension des phénomènes que nous retrouvons dans les systèmes complexes.

Cette idée avance le fait que des individus au comportement simple peuvent produire des ordonnancements collectifs fonctionnels complexes et elle ajoute que cela nécessite l'interaction de ces individus via un environnement spécifique (Detrain, Deneubourg, & Pasteels, 1999). La réalisation d'un but commun passe nécessairement par la coopération des individus étant donné que la problématique est de réaliser des performances collectives (ou tout au moins des actions de groupe) dont aucune entité participante prise individuellement n'est généralement capable. Cependant, la coopération, que nous retrouvons la plupart du temps dans les systèmes complexes, n'est pas forcément consciente. En effet, elle peut résulter d'un comportement automatique, comme celle que nous remarquons chez le termite pour la construction des termitières.

Les buts nécessitant la coopération sont innés et bien souvent inconscients mais sont sociaux car ils assurent la survie du groupe ou de l'espèce (Frontier, 1977). De même, un individu peut avoir besoin d'un autre parce que cet autre individu a des compétences qu'il n'a pas, ou parce qu'il faut être plusieurs pour réaliser la tâche : c'est là le but de la spécialisation. De nombreux phénomènes de ce type sont présents dans les systèmes complexes. Ce sont eux qui régissent les interactions entre les entités de l'environnement et qui donnent cette impression d'organisation sociale avancée à un observateur se positionnant à un niveau macroscopique (Frontier & Pichod-Viale, 1995).

#### II.1.2.b. Les Fourmis

Nous retrouvons les mêmes phénomènes chez les fourmis (Deneubourgh J.-L. A., 1976; Passera, 2006) lors de la prospection de nourriture. Dans un premier temps les fourmis se déplacent aléatoirement. Quand elles rencontrent une source de nourriture, elles chargent leur butin et rentrent à la fourmilière. Sur leur chemin, elles laissent une trace de phéromone plus ou moins forte en fonction de l'importance de la source. Les fourmis qui se trouvent à proximité de ce tracé chimique sont attirées, le suivent et le renforcent à leur tour. Ainsi, il se met en place une boucle de *rétroaction positive* jusqu'à ce que la source soit épuisée ou qu'un chemin rencontré ait un gradient de phéromone plus important. Il y a alors de moins en moins de fourmis sur le tracé initial et, cette fois, une boucle de *rétroaction négative* s'enclenche.

Comme les termites, les fourmis sont des insectes primitifs. Ils réagissent à des stimuli qu'ils rencontrent dans leur environnement et qui proviennent de leurs congénères. Cela implique donc qu'il y ait un nombre suffisant d'individus à la base, ce qui rejoint la définition que nous avons donnée des systèmes complexes. Que ce soit pour la prospection de nourriture chez la fourmi, ou pour la construction des nids chez les termites, les individus se trouvant tous sur le même milieu ont une première phase d'incoordination ou les insectes se déplacent au hasard, puis, la structure complexe se met en place progressivement par l'interaction des individus entre eux et avec leur environnement.

D'une manière générale, dans les systèmes complexes, il y a *émergence* d'un phénomène qui semble provenir d'une organisation complexe mais qui, en fait, résultent de comportements individuels qui répondent à des règles simples. En aucun cas les insectes ont conscience du travail réalisé collectivement (Bonabeau & Theraulaz, 1994).

#### II.1.2.c. Les Abeilles

L'abeille est tout aussi primitive que les termites en ce qui concerne la construction de la ruche qui relève d'automatismes stimulés par l'avancement de la construction elle-même. Par contre, pour la prospection de nourriture, elle procède différemment (Camazine, 1991; Camazine, Deneubourg, Franks, Sneyd, Bonabeau, & Theraulaz, 2001). Elles peuvent sélectionner leur source de nourriture en fonction du meilleur coût d'exploitation/bénéfice et aussi déplacer très rapidement leur zone d'activité. De la même façon que pour les fourmis, l'amplification de l'information, par les phénomènes sociaux et de masse, concentre l'activité collective de récolte. Cependant, leur comportement individuel est différent. En effet, de retour à la ruche, l'abeille effectue une danse qui indique aux autres individus l'importance, la distance, la facilité d'accès et la direction de la zone dont elle provient. Ainsi, un véritable protocole de communication est mis en place avec une évaluation individuelle des caractéristiques de la source de nourriture.

Dans les systèmes complexes, les individus peuvent donc interagir soit par le biais des agissements qu'ils font sur l'environnement et qui sont discernables pour les autres agents (appelés ainsi car ils agissent sur le système), soit par l'intermédiaire d'une communication plus explicite en passant pas l'intermédiaire de messages. Nous remarquons toutefois que les entités interagissent, s'échangent des flux d'informations, ou modifient le monde mais elles n'agissent jamais directement sur les représentations internes d'une autre.

En effet, le flux de données que représente le message envoyé ou laissé à l'intention d'un autre individu est d'abord interprété selon un schéma propre à l'acteur concerné qui change par lui-même son comportement ou son objectif. Nous retrouvons ici les notions d'interaction, de coordination, de coopération ou encore de compétition. Les agents peuvent coopérer, mais aussi entrer en compétition, et c'est pour ces raisons que la notion de coordination est très importante pour définir les interactions qui existent au sein d'un système complexe.

La coordination peut servir également à résoudre des situations de conflit. Ces situations surviennent lorsqu'il y a compétition entre individus, par exemple pour une ressource rare. L'utilisation d'une ressource par un des protagonistes peut alors empêcher un autre d'atteindre son objectif.

#### II.1.2.d. Les Loups

Dans les populations animales, la coordination est définie par la structure ou la hiérarchie sociale et en même temps, elle conditionne cette structure. Le loup, par exemple, est un animal social (Peters, 1979). Il vit au sein d'un groupe d'individus. Ce groupe, la meute, est constitué d'environ dix à quinze individus, très soudés, au sein duquel règne une hiérarchie stricte. Ils vivent sur un territoire dont l'étendue varie selon la richesse en proies. Le territoire est vigoureusement défendu en cas d'intrusion d'autres meutes.

Au sein de la meute, le sommet de la hiérarchie est occupé par un couple dominant. C'est lui qui prend l'initiative des départs en chasse, des déplacements et du marquage du territoire. La dominance de ce couple n'est pas définie une fois pour toute, mais peut-être remise en cause. Au niveau inférieur à ce couple, se trouve la classe des subdominants, qui regroupe les individus adultes non reproducteurs et qui participent aux différentes activités de la meute (chasse, élevage des louveteaux par exemple). Enfin, au bas de la hiérarchie se trouvent les jeunes.

Ce type d'organisation favorise la survie du groupe ; elle facilite la chasse, et améliore les chances de survie des louveteaux (leur prise en charge est assurée par tous les membres du groupe). Cette vie en meute est une caractéristique des loups, que nous retrouvons quel que soit le lieu où ils vivent.

Nous remarquons qu'à la différence des termites ou des fourmis la coordination a lieu par l'intervention d'un dirigeant et d'une hiérarchisation. Cela est souvent le cas dans les sociétés où les entités ont une certaine supériorité cognitive. Par conséquent, la structure sociale stricte d'une meute impose une communication très forte entre chaque membre. Régulièrement, des comportements d'intimidation de la part des dominants et de soumission de la part des dominés limitent les risques d'apparition de conflits. Cela assure une entente mutuelle indispensable à la cohésion du groupe. Nous voyons que chez le loup, en fonction de l'appartenance au groupe, il y aura coopération vers un but commun ou conflit pour des ressources partagées. La coordination se met en place quand elle est utile, au travers de la perception conjointe des situations et des actions des autres.

### *II.1.3. Conclusion et Notion d'Emergence*

Dans les différents cas de systèmes complexes que nous venons de voir, les individus interagissent de manière passive, parce qu'ils entrent en conflit pour des ressources, ou parce qu'ils modifient leur environnement en y laissant des marques reconnaissables par le groupe... Certaines espèces ont des interactions plus variées, en particulier, les individus qui les constituent ont des interactions intentionnelles et utilisent des systèmes de communication, ce qui leur procure une certaine forme d'intelligence individuelle plus développée. Bien qu'il existe, en effet, chez ces groupes d'individus différents niveaux cognitifs, nous remarquons qu'ils fonctionnent tous selon la paire stimuli/réponse (quelque soit la complexité des stimuli).

Les sociétés d'animaux que nous venons de décrire, ainsi que les parallèles que nous avons faits afin de caractériser les systèmes définis par ces sociétés, nous amènent à conclure sur un certain nombre de considérations à propos des systèmes complexes qui font l'objet premier de cette partie. Bien que les sociétés d'animaux sociaux nous aident à comprendre les systèmes complexes, nous pouvons dire, en première approximation et au regard des propriétés que nous avons mis en exergue, que la majeure partie des systèmes qui nous entourent peuvent être considérés comme complexes.

En effet, la majorité des systèmes et des organisations qui nous entourent regroupent un nombre plus ou moins important d'acteurs reprenant une ou plusieurs des propriétés évoquées. Les exemples de modèles étudiant de tels systèmes sont variés et foisonnent dans la littérature. Ces études sont généralement réalisées avec le plus de simplifications possibles, parfois même d'une façon trop réductrice par rapport à la réalité. Il faut donc garder en tête que, dans le monde qui nous entoure, la complexité est la règle et la simplicité l'exception.

Nous résumerons donc en décrivant un *système complexe* comme un système composé d'un grand nombre d'entités en interaction locale et simultanée, chacune de ses parties étant indépendante. Dire ici que les parties sont indépendantes, ne signifie pas qu'elles n'interagissent pas avec les autres mais seulement que la connaissance de l'état d'une partie ne fournit pas ou peu d'informations sur l'état des autres parties ou du système dans sa globalité. En réalité, il n'existe pas de définition formelle largement acceptée de ce qu'est un système complexe. Néanmoins, dans les exemples que nous venons de voir, nous remarquons qu'un certain nombre de points communs peuvent être retenus pour tenter de caractériser ces systèmes.

Tout d'abord le modèle d'interaction est non trivial, c'est-à-dire que ce n'est pas uniquement « tout le monde qui interagit avec tout le monde » (il y a au moins des liens privilégiés). Les interactions sont locales, il y a peu ou pas d'organisation centrale. Il en est d'ailleurs de même pour la plupart des informations transitant dans le système. De plus, il existe des boucles de rétroaction : l'état présent d'une entité a une influence sur son état futur via l'état d'autres entités et de son environnement (Forrester, 1980). Il est aussi important de remarquer que ces entités peuvent être elles-mêmes des systèmes complexes (une société est composée d'humains eux-mêmes composés d'organes puis de cellules). Le système et ses sous-systèmes sont ouverts et donc soumis à une activité endogène ; il y a des flux de données (énergie, information...) dans le système et sur sa frontière. Cette dernière peut être floue, par exemple, en considérant à nouveau le système complexe « un humain », à partir de quel instant devons-nous prendre en compte la nourriture ou l'air absorbé comme ayant une action significative sur le corps ?

Nous observons alors des comportements particuliers aux systèmes complexes résultant de ces propriétés. La plus importante est l'auto-organisation et l'émergence de propriétés ou de structures cohérentes comme l'apparition de « motifs » particuliers (Von Neumann, 1966 b).

Un autre caractère des systèmes complexes réside dans la robustesse locale et la contrôlabilité à moyenne échelle (Ferber, 1994). En effet, puisqu'il y a de nombreux liens (éventuellement créés ou remaniés par le système lui-même), si un élément est affecté par un événement extérieur, ses voisins le seront aussi. Il s'ensuit que le système est souvent plus robuste à une petite perturbation locale non désirée qu'il ne le serait sans les liens. Mais du même coup, modifier globalement le système (et donc potentiellement le contrôler) peut être fait grâce à une perturbation moins grande que dans le système sans liens. Cette perturbation est cependant très difficile, voire impossible, à cibler de prime abord. Assurément, l'évolution du système reste imprévisible car la connaissance d'une partie du système ne permet pas d'affirmer que le reste est en moyenne dans le même état. La réalisation d'une abstraction de ces systèmes reste donc une tâche ardue.

Comme nous l'avons déjà abordé au §1.2 de ce chapitre, la modélisation de tels systèmes passe alors par des méthodes de simulation susceptibles de s'inspirer de comportement que nous pouvons retrouver dans la nature (Rennard, 2000). Dans ce sens, nous abordons dans la suite les principes énoncés, entre autres, par l'Intelligence Artificielle Distribuée (IAD) qui offre des concepts et des outils adaptés à ce type de modélisation.

## II.2. Principes de l'Intelligence Artificielle Distribuée, de la Vie Artificielle

Nous avons montré dans la partie précédente que l'approche *systemique* est une voie nécessaire dans l'étude des systèmes complexes. L'étude formelle des systèmes est apparue au XIX<sup>ème</sup> siècle avec la naissance de l'industrie. C'est à ce moment là que furent conceptualisées les notions de *régulation* (feed-back) et de contrôle, essentielles, à cette époque, pour assurer le fonctionnement sans risques des machines à vapeur par exemple. Dans la première moitié du XX<sup>ème</sup> siècle, Ludwig von Bertalanffy théorisa le fonctionnement des systèmes biologiques (Von Bertalanffy, 1968; Von Bertalanffy, 1987) (Théorie Générale des Systèmes). Puis, sous l'impulsion de Norbert Wiener, la *cybernétique* fut créée en tant que « théorie de la communication » dans les années 1940 (Wiener, 1ère Edition 1948, seconde 1961).

La cybernétique, est une méthode d'analyse scientifique, qui consiste à identifier les éléments (ou composantes) d'un système et leurs connexions et à en déduire les propriétés des phénomènes globaux qu'ils induisent. La cybernétique constitue une approche des phénomènes qui étudie l'information, sa structure et sa fonction dans les interactions systémiques. C'est la science générale de la régulation et des communications dans les systèmes naturels et artificiels (Wiener, 1ère Edition 1948, seconde 1961). La cybernétique se définit comme la science des systèmes, un système étant lui-même défini à la manière d'un ensemble d'éléments en interaction, dont le tout comporte des propriétés dont sont dénuées ses parties prises séparément. Les interactions entre les éléments peuvent consister en des échanges de matière, d'énergie, ou d'information par exemple.

La cybernétique a mis en évidence que n'importe quel organisme est constitué d'un ensemble d'organes plus ou moins grands combinés dans un certain ordre pouvant être traduit par des « règles d'assemblage » ou de « disjonction ». Une organisation (ou « organisme » de quelque nature) est le plus souvent décrite en termes de structure (ce qu'elle est) et parfois comme une fonction (ce qu'elle fait) et rarement en termes de correspondance (*évolution adaptative*).

La description d'une organisation en termes de correspondance, d'adaptation et de convenance aux conditions du contexte et de l'environnement révèle « l'explication cybernétique » qui est d'un type logique différent de celui de l'explication causale : il ne s'agit plus de savoir pourquoi « quelque chose » s'est produit mais de savoir quelles contraintes ont fait que « n'importe quoi d'autre » ne se soit pas produit (Bateson, 1980).

Dans l'explication causale, une boule de billard *B* se déplace parce qu'elle est heurtée par une boule *A* sous tel ou tel angle et à telle vitesse, la trajectoire ou le comportement de la boule *B* est considéré entièrement prédictible à partir des conditions initiales. Dans l'explication cybernétique, l'examen des restrictions ou contraintes du système montre que « n'importe quoi » ne peut se produire et que seule une « réponse appropriée » à ces contraintes peut survivre, se développer et se reproduire. À partir de l'explication cybernétique se déploient les principes de l'équifinalité et de multifinalité qui sont très loin du précepte déterministe que nous avons déjà croisé plus haut.

Le comportement d'une fourmi devient intelligible au regard des contraintes topographiques du parcours et des contraintes du ravitaillement associé à un processus stochastique du hasard des rencontres et de la nécessité de ramener la nourriture. *L'équifinalité*, formulée par Ludwig Von Bertalanffy, désigne un même état final qui peut être atteint à partir de différents états initiaux, à travers différentes voies et avec différents moyens. En d'autres termes, des mêmes effets peuvent avoir des causes différentes. C'est une sorte de « suite convergente » (Von Bertalanffy, 1968). *La multifinalité* dans la théorie des contextes (Wilden, 1980), en termes de causes et d'effets, énonce que des mêmes causes peuvent produire des effets différents en une sorte de « suite divergente ». Nous pouvons alors résoudre l'énigme d'un singe qui manipule au hasard les touches d'un clavier d'ordinateur et qui écrit un texte digne d'un grand auteur.

Le paradigme cybernétique a vu sa concrétisation technologique à travers deux disciplines dont les enjeux et les concepts de départ diffèrent sensiblement. Il s'agit de l'Intelligence Artificielle (IA) et de la Vie Artificielle (VA). L'IA, la plus ancienne de ces disciplines, est contemporaine des premiers développements de la cybernétique. Elle s'intéresse à la conception de machines pouvant simuler la cognition humaine.

L'IA a connu de nombreux succès dans des applications extrêmement variées et particulièrement dans la conception de systèmes experts ou de réseaux de neurones. Initialement, les ambitions de l'IA étaient particulièrement élevées. Cette discipline espérait pouvoir créer des automates capables de traiter des problèmes très généraux comme la reconnaissance du langage, la traduction des langues naturelles ou la résolution universelle de problèmes. Il était donc question de modéliser le savoir-faire de l'expert. L'IA se diversifie donc dans de nombreuses voies. Cependant, au fil du temps, si elle a acquis le statut d'une science à part entière, elle s'est éloignée de son objet premier : créer des systèmes artificiels capables de reproduire les comportements intelligents de systèmes biologiques.

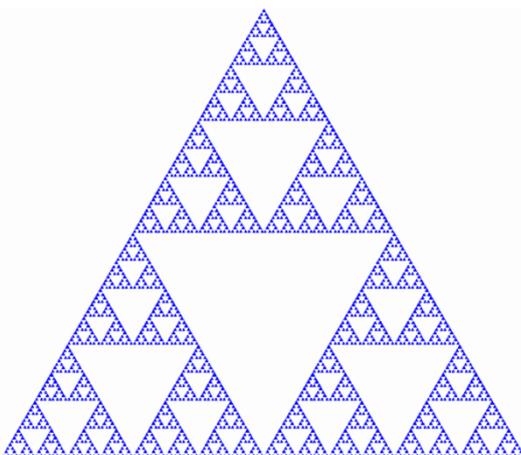
La VA, plus récente, diverge de l'IA sur certains points et la rejoint sur d'autres. Son domaine d'étude est plus vaste. Elle explore les caractéristiques du vivant en général. La vie artificielle est, plus qu'un changement de nom, un changement d'objectif.

Afin de disposer de points de repère, il est question de poser, ici, les principales étapes de développement de ces concepts. Nous nous intéresserons également à leurs applications technologiques.

C'est l'avancé de la technologie au XX<sup>ème</sup> siècle qui a permis de concrétiser les recherches dans ce domaine et de ne plus se reposer que sur des spéculations philosophiques ou sur des expérimentations biologiques. Cela débuta en 1936, avec un mathématicien anglais, Alan Turing (1912-1954), qui élabore le concept d'une machine à calculer « universelle » qui sera plus tard légitimement appelée machine de Turing. Il s'agit en réalité d'un multiplicateur utilisant la numération binaire, c'est-à-dire en quelque sorte l'ancêtre de l'ordinateur actuel (Turing & Girard, 1995).

Dans les années quarante et fort de la réalisation de Turing, un mathématicien du nom de Stanislaw Ulam proposa de faire évoluer des constructions graphiques à partir de règles élémentaires et dont la configuration dépendait de leur propre état antérieur. Il fut le premier à utiliser un espace divisé en cellules pouvant prendre deux états (allumés ou éteints) et qui, partant d'une configuration initiale, évoluent en fonction de règles de voisinage (premiers concepts des automates cellulaires). Il fut stupéfait quant au résultat (observer sur l'un des premiers ordinateurs) : il remarqua que ces règles simples pouvaient engendrer des figures complexes qui même dans certains cas pouvaient se reproduire (Ulam, 1983).

C'est à la suite de ces expériences qu'un tournant décisif est marqué, car, avec l'aide d'Ulam, le chercheur John Von Neumann met au point le premier automate cellulaire (le Kinematon). Il s'intéressait à la théorie des automates autoreproducteurs (Figure 1.8) et avait l'ambition de réaliser un automate capable de reproduire n'importe quel automate dont il avait la description y compris lui-même (constructeur universel). Les processus d'auto-organisation et d'autoreproduction, tels que Von Neumann les a énoncés, s'approchent fortement du principe de fonctionnement du génome humain (Von Neumann, 1966 b). En effet, une machine construite à partir d'une autre devait avoir les informations nécessaires pour réaliser la même duplication de soi. Cette machine lui permettait donc de s'affranchir d'une description exhaustive de la réalité et pouvait ainsi générer des phénomènes complexes à partir d'éléments simples. Mais le plus troublant c'est que cela a lieu au début des années quarante et que l'ADN n'est seulement découvert par Watson et Crick qu'en 1953.



**Figure 1.8 : Approximation à Sept Itérations du Triangle de Sierpiński**

**Construit à partir du principe du triangle de Pascal avec  $2^n$  lignes. Les nombres pairs sont coloriés en blanc et les nombres impairs en bleu, alors nous observons la redondance du triangle d'origine qui s'*auto-reproduit*.**

En parallèle avec ces recherches sur la VA, le concept de l'IA trouve sa voie avec W. Mc Culloch et W. Pitt dans leur présentation en 1943 du neurone formel et des réseaux de neurones. La caractéristique la plus novatrice de ces modélisations mathématiques, qui reprennent les principes d'un neurone biologique, est leur capacité d'apprentissage. Ils veulent montrer ainsi que les mécanismes de la pensée sont équivalents au fonctionnement d'une machine de Turing (Herault & Jutten, 1994). L'Intelligence Artificielle est directement issue des concepts cognitivistes. C'est-à-dire qu'elle envisage le fonctionnement cérébral sous un angle logico-déductif, et considère, de fait, que l'acte cognitif s'effectue à travers une manipulation de symboles élémentaires. A travers le cognitivisme, l'IA établit une analogie fondamentale entre le fonctionnement cérébral et celui de l'ordinateur. C'est pourquoi certains auteurs préfèrent le terme de computationnalisme pour désigner cette orientation théorique des sciences cognitives dont l'IA est le développement technologique le plus évident.

En 1970, John Horton Conway réalise le plus célèbre des automates cellulaires qui fait, aujourd'hui encore, l'objet de nombreuses recherches (Wolfram, 1986; Wolfram, 2002) : « le jeu de la vie ». Il s'agit d'une grille de cellules pouvant avoir chacune huit voisins qui peuvent prendre deux états : vivant ou mort. Une cellule morte entourée de trois cellules vivantes devient vivante ; une cellule vivante entourée de deux ou trois cellules vivantes reste vivante ; dans tous les autres cas, la cellule « meurt » du fait de l'isolement ou de la surpopulation (Figure I.9). Cet automate permet l'introduction et le développement de principes de base tel que l'émergence de structures stables ou l'autoreproduction.

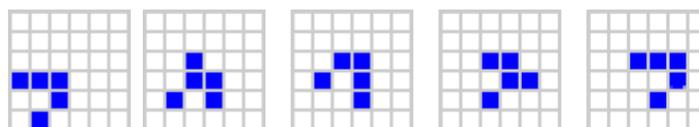


Figure I.9 : Le Jeu de la Vie

**Le planeur est une des structures les plus répandues du jeu de la vie. Structure simple constituée de cinq cellules, elle se déplace de manière quasi-rectiligne dans l'univers du jeu. Périodique, sa configuration se retrouve identique à elle-même au bout de quatre générations**

Le concept de neurone formel comme celui d'automate cellulaire se base sur le fait de simplifier le problème étudié en utilisant des éléments plus fondamentaux pour mettre en œuvre le système. Dans le premier cas, il s'agit d'entités matérielles et, dans le second, d'acteurs logiciels mais les principes de fonctionnement se ressemblent beaucoup. C'est le début des concepts de systèmes distribués et de leur mise en œuvre : l'Intelligence Artificielle Distribuée (IAD). Elle est différente de l'IA par le fait qu'elle ne considère plus la modélisation du comportement intelligent d'une seule entité ou d'un groupe homogène. Elle considère le comportement collectif d'une collection d'entités, aux divers caractéristiques, misent en relation par des lois et des propriétés simples, afin de voir émerger les structures souhaitées.

Contrairement à ce qu'on pourrait croire, la VA, qui est une branche de l'IAD, ne relève pas d'ambitions aussi généralistes que l'IA à ses débuts et évite ainsi l'écueil de l'universalité. Il est vrai que la VA est une discipline plus jeune et qu'elle bénéficie, par conséquent, de l'expérience de l'IA. La Vie Artificielle exploite les concepts issus des courants cognitiviste et connexionniste qui partagent les sciences cognitives. Elle propose donc des solutions qui s'appuient tantôt sur l'approche symbolique, tantôt sur l'approche auto-organisationnelle, ou construit ses modèles à partir d'une combinaison des deux méthodologies. L'un des précurseurs de ce mouvement, Christopher Gale Langton, organise, en 1987, la première conférence internationale sur la Vie Artificielle à Santa Fe au Nouveau Mexique (Langton, 1987). Voici quelques uns de ses mots qui résument la nouvelle position vers laquelle la vie artificielle va se diriger par la suite :

*« La vie artificielle est l'étude des systèmes construits de mains d'hommes qui exhibent des comportements caractéristiques des systèmes naturels vivants. Elle vient en complément des sciences biologiques traditionnelles qui analysent les organismes vivants, en tentant de synthétiser des comportements semblables au vivant au sein d'ordinateurs et d'autres substrats artificiels. En étendant les fondements empiriques sur lesquels la biologie est basée au-delà de la vie à base de carbone qui a évolué sur Terre, la vie artificielle peut contribuer à la biologie théorique en positionnant la vie telle que nous la connaissons au sein d'un espace plus large : la vie telle qu'elle pourrait être. »*

La vie artificielle va permettre une exploration des comportements possibles d'un système. Le principe est de mettre en relation des entités ayant des caractéristiques simples qui leur permettront d'interagir, éventuellement de se reproduire, les unes avec les autres dans un environnement spécifique afin d'obtenir un comportement globale satisfaisant (Dupont, Kökösy, Biela, & Saadane, 2002).

Ce comportement est alors en relation étroite avec le comportement du vivant ou intéressant pour la résolution d'un but ou d'un problème collectif. LANGTON poursuit alors :

*« La leçon la plus surprenante que nous avons tirée de la simulation de systèmes physiques complexes sur ordinateurs est qu'un comportement complexe n'a pas nécessairement de racines complexes.[...]Un comportement d'une formidable complexité peut émerger à partir d'assemblages de composants extrêmement simples »*

Il entend par là que l'étude du vivant au sein d'un simulateur (ordinateur ou calculateur) doit prendre en compte les seuls éléments nécessaires et non les éléments suffisants. En effet, dans un cas habituel de modélisation, il y a toujours une étape préalable d'élimination de certains paramètres contextuels qui sont peu influents mais peuvent parasiter la compréhension du modèle. Mais, dans le cas de systèmes d'une grande complexité, cela devient une tâche d'une ampleur considérable. Habituellement, nous procédons par une étude descendante, c'est-à-dire que les modèles sont construits par l'analyse et la recherche des variables pertinentes. Cette approche caractérise d'ailleurs le modèle théorique de pensée de l'IA qui s'inspire du vivant pour en tirer les principes essentiels.

Langton suggère, par son étude de la vie artificielle, d'adopter une nouvelle façon de procéder. A l'inverse, il propose de faire une étude ascendante des systèmes. Nous authentifions les variables influentes dans le modèle au lieu de regrouper un ensemble de variables et d'éliminer préalablement celles qui parasitent la compréhension du système. Nous procédons alors par synthèse pour étudier de tels systèmes, ce qui simplifie considérablement le principe de la modélisation.

Cette façon de penser soulève énormément de questions sur la façon de faire apparaître des structures à un niveau d'organisation supérieur en ne définissant que les lois locales au niveau inférieur. C'est à travers cette idée que va naître la notion puissante d'émergence autour de laquelle toute la problématique de la vie artificielle est construite. Les interactions et la communication au sein du système ou par le biais de l'environnement conditionnent cette émergence. Elles sont définies de façons très diverses en fonction du comportement collectif souhaité et c'est ce qui caractérise à la fois la richesse et la flexibilité des systèmes complexes (Bonabeau & Theraulaz, 1993).

De fait, la VA s'attache souvent à modéliser des comportements ou des mécanismes primordiaux des systèmes vivants comme l'auto-régulation, la prédation ou la reproduction.

Elle consacre également une large part de ses efforts à la réalisation d'organismes virtuels, c'est-à-dire à la simulation de créatures vivantes à l'aide des langages formels de l'informatique. Une autre branche de cette discipline s'emploie à la conception de réalisations matérielles, sous forme de robots autonomes (utilisant en partie les concepts de l'IA), ou à partir des matériaux mêmes des êtres vivants.

Il est vrai que la VA traite plus de comportements « réflexes » que de raisonnements logiques ou d'actes cognitifs en comparaison avec l'IA. La VA mérite cependant toute notre attention, et ce, pour deux raisons. Par les concepts qu'elle véhicule, la VA représente une alternative intéressante à l'approche strictement computationnelle. Ensuite, il est bien évident que le traitement computationnel de l'information implique une manipulation de symboles dont la signification est extérieure au système. Or, en s'interrogeant sur l'émergence, en tentant de s'approcher le plus possible des mécanismes essentiels du vivant, la VA ouvre un débat capital : Comment le vivant peut-il être porteur de sens et à partir de quels mécanismes ? Comment un système artificiel peut-il disposer de caractéristiques équivalentes ? Quels rapports s'instaurent dès lors avec l'observateur du système ?

Nous pouvons légitimement nous poser la question suivante : si de la finalité, du but, dépendent les caractéristiques d'un groupe et de ces individus, pourquoi est-ce que des individus au fonctionnement simple ne suffiraient pas à obtenir un objectif donné s'ils sont mis en relation ? De fait, nous n'implémentons plus une tâche à réaliser mais toutes les entités et leurs comportements participant à la réalisation de cette tâche ainsi que leurs interactions.

Le fait d'avoir simulé le comportement individuel de chaque entité et ses interactions, l'ensemble est capable de faire émerger un comportement global à un niveau supérieur. L'IAD et la VA ont donc pour principe de recréer une intelligence artificielle de groupe par le biais d'individus autonomes. Elles s'inspirent des stratégies qu'ont développées les systèmes naturels afin de proposer des méthodes de résolution de problèmes ou dans un objectif général de « survie » du système. Cela nous permet de mieux comprendre notre environnement et de mieux le maîtriser mais aussi de fixer des modèles pour prévoir son évolution, ses fluctuations.

### III. Les Systèmes Multiagents : SMA

Les notions que nous avons abordées précédemment nous montrent qu'il existe une tendance de plus en plus générale à se diriger vers des systèmes distribués. Que ce soit par les réseaux comme Internet ou par le développement largement marqué de la programmation orientée objet (Hill R. C., 1993) bénéficiant des apports du langage UML (Unified Modeling Language), nous remarquons que la conception de programmes informatiques suit une démarche se tournant vers la réalisation de systèmes regroupant des ensembles d'entités plus ou moins autonomes.

L'informatique est en train de changer, de manière assez profonde. Tout d'abord, elle devient ubiquitaire, c'est-à-dire qu'elle est présente dans les objets de la vie courante : téléphones portables, assistants personnels, maison, etc. Elle évolue ainsi de manière de plus en plus diffuse et distribuée dans de multiples objets et fonctionnalités qui sont amenés à coopérer. La décentralisation des logiciels se développe maintenant inéluctablement du fait de la complexité des applications informatiques. L'interopérabilité, de plus en plus demandée en raison de la multitude de logiciels et de systèmes développés, pose aussi la question de communication et d'interactions entre différents acteurs ou éléments dans un but précis.

De plus, nous avons vu dans la section précédente que l'IAD offre un compromis à l'IA qui étudie le comportement intelligent d'un seul individu (connaissance et raisonnement). En effet, cette discipline apporte un enrichissement à la centralisation de l'expertise sur un système unique (que propose l'IA), en faisant émerger de nouvelles propriétés, de nouveaux comportements. L'IAD suggère de rendre compte également d'un comportement intelligent mais, pour sa part, issu de la collaboration d'une multitude d'*agents* autonomes, pouvant avoir un comportement social.

Cela demande d'avoir une robustesse et une adaptabilité des systèmes face à des situations particulières que peut apporter l'approche qu'offrent les *Systèmes Multiagents* (SMA). Les agents sont mis en relation afin d'analyser voire de résoudre des problèmes complexes.

La décentralisation est donc la règle, et une organisation coopérative entre modules logiciels est un besoin. Nous sommes ainsi naturellement conduits à donner plus d'autonomie et d'initiative aux différents modules logiciels. Le paradigme des systèmes multiagents propose un cadre de réponse à ces deux enjeux complémentaires : l'autonomie et l'organisation.

De fait, nous ne programmons plus la réalisation d'une tâche globale à accomplir, mais toutes les entités (et leurs comportements) participant à l'exécution de cette tâche ainsi que leurs interactions. Le fait de simuler le comportement individuel de chaque entité permet à l'ensemble d'être capable, d'après les principes soutenus par l'IAD, de faire émerger un comportement global de niveau supérieur.

Dans la suite, nous aborderons l'ensemble des notions qui gravitent autour des systèmes multiagents à commencer par la notion d'agent elle-même. Puis, nous évoquerons les limites de cette technique. En effet, étant donné la multitude de cas où nous rencontrons des systèmes complexes, nous pouvons dire que chaque SMA a des caractéristiques propres au sujet qu'il traite. Par conséquent, nous ferons la distinction entre le concept d'agents théoriques utilisés dans les SMA et les techniques employées dans les *Simulations Orientées Agents (SOA)* en montrant l'importance qui réside dans la distribution des rôles intervenants dans la réalisation de ces simulations.

### **III.1. Les agents**

Bien que le domaine des systèmes multiagents ne soit pas une discipline récente, elle fait aujourd'hui l'objet de nombreuses recherches et représente une branche très active en matière de simulation notamment. Cette diversité dans l'utilisation ne facilite pas la définition et en offre même le plus souvent une multitude en fonction du domaine et de la finalité recherchée. Le point récuratif, sur lequel tous s'entendent, est que l'agent est « une entité qui agit », c'est-à-dire capable de changer son environnement et la perception qu'il en a. Nous nous appuyerons dans la suite sur l'une des premières définitions de l'agent donné par Ferber (Ferber, 1995).

La plupart du temps, un agent est une entité réelle ou abstraite gouvernée par des objectifs, des buts internes, ce qui lui vaut d'être qualifié d'autonome. Il devra donc être capable d'agir sans pour autant qu'il soit explicitement sollicité. De plus, ces actions sont conditionnées par un certain nombre d'informations reçues ou perçues dans son environnement.

L'agent doit percevoir, au moins partiellement, son environnement afin d'agir sur lui toujours de façon « rationnelle » ; c'est-à-dire que sa réaction semble provenir d'un raisonnement plus ou moins intelligent et plus ou moins conscient dans le but de modifier son environnement et d'en obtenir l'état souhaité. L'agent est en quelque sorte son propre « moteur ».

Les différents agents interagissent dans cet environnement, ils sont donc conditionnés par leur entourage immédiat mais ils agissent sur l'environnement et donc le transforment. Ces transformations agissent alors à leur tour sur le comportement des agents et ainsi de suite. L'agent a donc un comportement social : il entretient des relations avec la collectivité conditionnées par des règles de comportement, ses connaissances et son fonctionnement interne (Figure I.10).

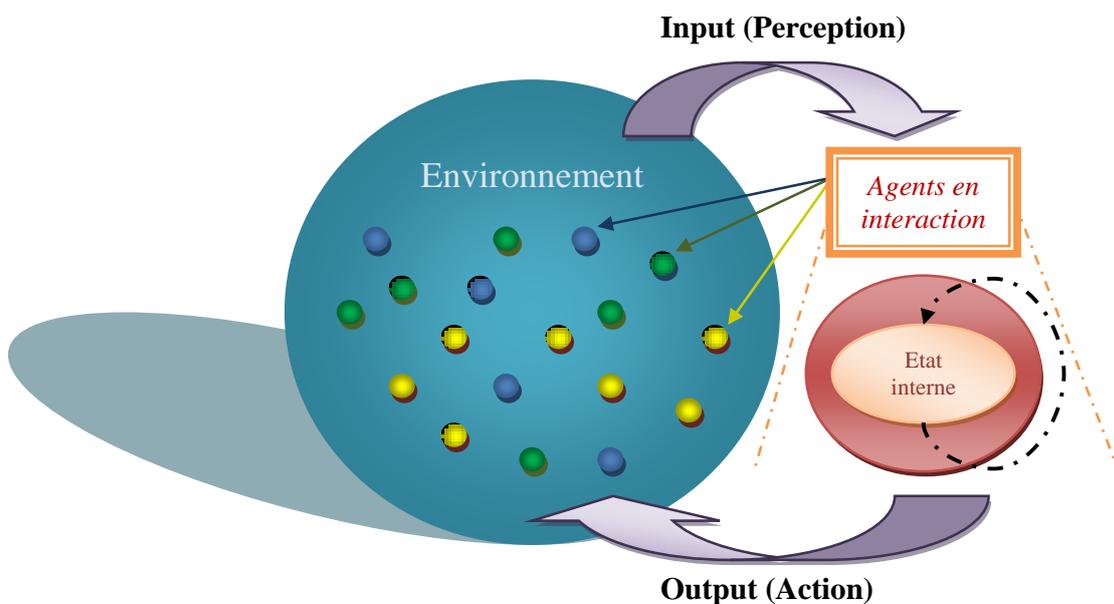


Figure I.10 : Fonctionnement d'un Agent

Il ressort de cette définition des propriétés clés comme l'*autonomie*, l'*action*, la *perception* et la *communication*. D'autres propriétés peuvent être attribuées aux agents. Nous citons en particulier la *réactivité*, la *rationalité*, l'*engagement* ou encore l'*intention*. Nous verrons plus en détail ces propriétés dans la section suivante.

D'une manière générale, les agents ont, selon les applications, des propriétés cognitives plus ou moins développées. Nous parlons de *granularité* des agents. Elles se séparent en deux classes : les *agents cognitifs* et les *agents réactifs*. Nous trouvons récapitulées dans le Tableau I.1 les différentes spécificités de ces deux types d'agent (Ferber, 1995).

Système d'agents réactifs	Système d'agents cognitifs
Pas de représentation explicite	Représentation explicite de l'environnement
Pas de mémoire de son histoire	Peut tenir compte de son passé
Fonctionnement stimulus / réponse	Agents Complexes
Grand nombre d'agents	Petit nombre d'agents

**Tableau I.1 : Les Deux Types d'Agents**

Les agents cognitifs sont dits de forte granularité (coarse grain). Ils sont capables à eux seuls de réaliser des tâches relativement complexes relevant parfois même des principes de l'IA (discipline qui est d'ailleurs basée sur la connaissance) (Woodridge, 2002). Ces systèmes, caractéristiques de l'IAD, regroupent généralement un petit nombre d'agents en interaction ayant tous une capacité de raisonnement propre basée sur les principes de croyance et d'intention avec leurs propres connaissances et leurs propres aptitudes à traiter et à réagir aux informations qui leur parviennent. Ces agents sont dit « intentionnels » et ont un comportement social dirigé par leurs croyances et leurs désirs, suivant un plan précis afin d'atteindre leur but (architecture BDI : Believe, Desire, Intention).

L'approche basée sur le concept d'agent réactif, plus proche des principes soutenus par la VA, part du fait qu'il est possible d'obtenir un comportement global « intelligent » sans que nécessairement chaque agent le soit de par ses propres capacités (Deneubourgh J.-L. , 1993). Il s'agit donc ici d'agents de faible granularité (fine grain), c'est-à-dire que, par la mise en œuvre de comportements et de mécanismes simples, le système est capable de faire émerger des structures complexes correspondant aux objectifs finaux à atteindre. A l'instar des insectes sociaux que nous avons déjà décrits, ces agents vont répondre à la loi stimulus/action. Ils n'ont qu'une perception très limitée de leur environnement et ils ne disposent que d'un protocole et d'un langage de communication réduit. Une multitude de petites entités est capable de réaliser les mêmes objectifs qu'une seule plus complexe. Cela augmente considérablement la robustesse du système étant donné qu'il est peu probable que tous les agents soient défaillants au même moment.

Toutefois, réduire un agent à l'une ou l'autre des deux catégories que nous venons de définir reste conceptuel. De fait, un système n'est pas forcément constitué d'un seul type d'agent et les agents ne sont pas nécessairement strictement d'une sorte ou d'une autre ; il existe plusieurs déclinaisons de ces définitions que nous appelons *agents hybrides* regroupant, dans des proportions plus ou moins importantes, les propriétés des deux types d'agent (Mandiau & Grislin-Le Strugeon, 2002).

### **III.2. Les Propriétés des Agents**

En premier lieu, nous avons déjà remarqué que les interactions jouent un rôle très important et même primordial. Elles définissent toute l'évolution du système. En effet, c'est grâce aux interactions ou à la coopération que les agents peuvent induire plus que la somme de leurs actions. Ces interactions provoquent un certain nombre de divergences entre les agents que nous solutionnons alors par des méthodes de résolution de conflits, par la coordination des actions du groupe qui se trouve amplifiée par le nombre d'agents (Ferber, 1996).

Nous classifions les interactions en deux sous-groupes distincts au niveau de la conception de SMA. D'un côté, il y a l'aspect communication et, de l'autre, les capacités sociales (collaboration et coordination) ; dans ce dernier cas, les interactions ont lieu sous forme d'actions sur l'environnement, lesquelles sont repérables par les autres et constituent des événements qui peuvent changer leur comportement (Ferber, 1995). Ces deux types d'interactions sont plus ou moins développés dans chaque SMA et prennent des formes plus ou moins poussées en fonction du type d'agent choisi pour remplir les objectifs fixés. Nous allons ici décrire les principes mis en œuvre pour permettre la bonne marche des interactions sans tenir compte du type d'agent et en partant des concepts les plus simples pour arriver aux notions relatives aux agents de plus forte granularité. Il ne tient alors qu'à l'expérimentateur de faire un choix dans sa démarche et sur les propriétés à inclure afin que la conception de la simulation soit en accord avec les finalités recherchées.

### *III.2.1. La Communication*

La communication sert au passage d'informations ou de données diverses entre agents. Il s'agit, par exemple, de transmettre des ressources, de donner un renseignement sur une aptitude, un état ou encore de demander l'accomplissement d'une tâche à un autre agent, etc. Quoi qu'il en soit, l'état interne du destinataire sera modifié et, dans la plupart des cas, la perception qu'il a des autres acteurs et de son environnement. Nous cherchons à induire chez le destinataire une sorte de reflexe pouvant aller jusqu'à la notion d'intention nouvelle en vue de la satisfaction du but recherché, de sa survie ou de celle du groupe.

Nous retrouvons les communications sous deux formes. Celles intentionnelles qui sont explicites entre agents (souvent cognitifs) par le biais d'envois de messages personnels par exemple (Woodridge, 2002). Celles réactives qui se retrouvent plutôt sous la forme de signaux entre agents réactifs (Ferber, 1994). C'est la forme de communication des sociétés animales comme nous l'avons vu plus haut.

Nous retrouvons trois niveaux dans la mise en œuvre de la communication entre agents ; il y a en premier lieu le *support*, ensuite le *langage* et *l'acointance* qui caractérise la relation entre agents.

### III.2.1.a. Le Support

En ce qui concerne le support, nous parlons même de *mode de communication* à part entière.

#### *i. Le Partage d'Informations*

Le premier mode est celui du partage d'informations. Les agents ne sont pas dans ce cas directement reliés mais utilisent une structure de données commune dans laquelle nous retrouvons, au fur et à mesure de l'évolution du système, l'état courant du problème. Le mécanisme du tableau noir (black board) reprend cette idée en proposant une base de données commune où tous les problèmes à traiter sont regroupés ; les agents viennent la consulter et réalisent les tâches que leurs capacités leur permettent d'effectuer ; ils modifient le tableau en fonction de la partie du problème qu'ils ont pu traiter et/ou le complètent en fonction des nouvelles tâches à effectuer pour lesquelles ils ne sont pas compétents (Coquillard & Hill R. C., 1997). Les avantages de cette méthode résident dans le fait qu'il est possible de traiter un très grand nombre d'informations en même temps. De plus, le parallélisme des agents ainsi que la gestion temps réel permettent de pouvoir retracer l'évolution de la résolution du problème par étape.

#### *ii. L'Envoi de Messages*

Le second mode est la communication par envoi de messages (Durfee, Lesser, & Corkill, 1987; Woodridge, 2002). Cela suppose que la « connaissance » est localisée, c'est-à-dire qu'elle est propre à l'agent, ce qui confère au système une certaine modularité dans le sens où l'agent pourra modifier seul son comportement s'il le juge utile. Pour qu'il puisse y avoir échange de données entre agents, il faut qu'un agent ait une connaissance, même minime, de son environnement et la connaissance ou la perception d'autres agents. La résolution du problème est dans ce cas entièrement distribuée que ce soit du point de vue de la connaissance ou des méthodes mais aussi en ce qui concerne la bonne marche de la résolution.

### *iii. L'Environnement*

Un mode intermédiaire de communication peut être utilisé. Il s'agit d'utiliser l'environnement comme support (Ferber, 1994). Le message est alors laissé sur place à l'intention d'une certaine catégorie d'agents. C'est le système de communication utilisé par les fourmis quand elles laissent dans leur sillage une trace de phéromone après la découverte de nourriture.

Cette communication est non intentionnelle car elle s'effectue par stimuli. Cette « technique des phéromones » permet, par exemple, d'optimiser, au chemin le plus court, la distance d'un parcours entre deux positions (elle est d'ailleurs largement utilisée dans les réseaux de communication) (Ferber, 1996).

#### III.2.1.b. Le Langage

Quel que soit le type de support, nous cherchons à mettre en communication un certain nombre d'agents. Cette démarche peut s'apparenter en quelque sorte à la création d'un réseau. Pour réaliser le protocole ou pour modéliser le problème, certains experts préconisent de se baser sur les systèmes distribués comme Internet par exemple (Labidi & Lejouad, 1993). Les agents ont besoin d'un langage commun afin de coordonner leurs actions et pour échanger les informations nécessaires à la résolution du problème. Comme sur un réseau, une solution passe par la création d'un ensemble de primitives que chaque agent est capable de comprendre et d'utiliser. Cet ensemble de mécanismes de communication interprocessus constitue le *protocole*.

Nous retrouvons les étapes habituelles d'une communication sur un réseau et les primitives qui y correspondent : dans un premier temps, il y a ouverture de la connexion (appelle de la primitive), ensuite, il faut identifier le nœud du réseau qui sera le récepteur, puis, il y aura alors envoi et réception de données.

Bien que nous prenions exemple sur des architectures standards de réseaux, la communication dans un SMA n'est pas anodine. En effet, elle remet en cause l'état interne du destinataire. Elle permet la synchronisation des actions ou la résolution de conflits (parfois même par la négociation dans le cas particulier d'agents à forte granularité). Pour cela, le récepteur du message doit pouvoir faire la distinction entre une requête, une question ou une information. Dans ce cas, la sémantique du message doit être la plus explicite possible. Il est possible de se baser sur la « théorie des actes » et en particulier sur les actes illocutoires. Le ton de la voix pour faire comprendre à un interlocuteur qu'il s'agit d'une question ou d'une affirmation est un exemple d'acte illocutoire.

Il s'agit donc d'un codage implicite compris dans le message pour signifier que le message est un ordre ou une requête par exemple. Cette notion est donc essentielle dans le langage de communication des agents cognitifs car elle leur permet d'avoir des discussions « intelligentes ». Bien d'autres aspects peuvent être pris en compte et de nombreux chercheurs relevant plus de l'IA se basent sur l'analogie avec des domaines s'appuyant sur la sociologie des organisations pour complexifier ou améliorer les protocoles de communications voire d'autres aspects des SMA (comme l'approche autopoïétique de Maturana et Valera) (Maturana & Valera, 1994).

### III.2.1.c. Les Accointances

Le troisième et dernier niveau dans l'élaboration de la communication regroupe les agents avec qui un agent interagit : ses *accointances*. Nous retrouvons une accointance soit par un nom d'agent soit par sa catégorie, son « type » ou par une compétence qu'il a déclarée. L'accointance représente les relations entre agents au sens large du terme. C'est-à-dire l'image qu'un agent a d'un autre, une sorte de représentation mutuelle des capacités ou du caractère de chacun (Ferber, 1995). Il existe des accointances statiques qui seront définies au moment de la conception, ou des accointances dynamiques. Dans ce cas, un agent peut en rencontrer d'autres et se faire seul un panel de relations. La difficulté alors pour l'agent est de reconnaître un autre agent qui aura l'intention de coopérer et qui en sera capable.

Nous remarquons, une fois encore, que les SMA se trouvent dans un contexte totalement distribué tant au niveau des acteurs que des décisions d'évolution du système. Les agents peuvent coopérer vers un but commun et il est nécessaire que leurs actions respectives soient coordonnées. Pour la résolution de conflits dus à des ressources ou pour coordonner une action collective par exemple, il est crucial que les agents aient des capacités sociales.

### *III.2.2. Coopération et Emergence*

#### *III.2.2.a. La Coopération Entraîne...*

Pour que l'agent puisse être considéré comme coopératif, il lui faut des compétences. En premier lieu, il faut qu'il sache repérer les informations qui lui sont fournies en provenance de la transformation de son environnement ou de la communication avec les autres agents. En second lieu, l'agent doit pouvoir remodeler son état interne ou son plan d'action en fonction des données qui lui parviennent (Ferber, 1994).

La coopération consiste à augmenter les performances et les capacités des agents pris séparément de manière quantitative (un agent supplémentaire augmente les performances du groupe) et qualitative (les capacités d'un agent ne suffisent pas nécessairement à réaliser une tâche complète).

Par conséquent, l'agent peut avoir des intentions et des croyances qu'il doit pouvoir changer lors de l'exécution ; elles lui permettront de modifier sa démarche. Ils doivent donc « percevoir, décider et agir » selon le plan qu'ils pensent être le plus approprié à la situation. Ainsi, il a été défini deux types de modèle de coopération : la coopération par partage de tâches (par commande avec un superviseur ou par appel d'offre) ou par compétition (Jean, 2002).

Ces deux modes, de même que la coopération en général, créent des conflits qui pourraient survenir entre agents lorsqu'il y a une relation de dépendance entre leurs actions. Pour éviter ces situations conflictuelles, nous pouvons mettre en place des structures d'organisation. C'est alors le rôle de la coordination et de la négociation de les résoudre. La coordination est étroitement liée à la planification de part le fait que l'avancée de la résolution d'un problème sert aux autres agents et qu'il faut une certaine mise en ordre de la résolution. Toujours sur le même principe, la résolution de conflit peut avoir lieu soit localement, après son identification par les agents concernés (alors autonomes), soit de façon globale, par une unité de niveau supérieur qui sera éventuellement capable de planifier le problème (Ferber, 1995).

En ce qui concerne la négociation, elle constitue un processus difficile à mettre en place. En effet, il faut pouvoir remodeler les croyances des agents. Pour cela, il faut que chaque agent ait un point de vues, une opinion, et qu'un mécanisme de décision leur permette de redéfinir un nouveau but sur lequel ils doivent se focaliser pour converger vers la solution au problème global (Woodridge, 2002).

La plupart du temps, ces structures ne sont présentes que dans le cas d'agents cognitifs car pour les agents réactifs l'organisation est sous-jacente, non explicitement définie et émerge du comportement collectif. Nous pourrions citer la structure horizontale où tous les agents sont au même niveau et la structure verticale où au contraire il existe une hiérarchie avec des relations maître/esclave. D'autre part, des modes de coopération plus simples existent aussi comme le regroupement et la multiplication (meilleure survie) ainsi que la spécialisation des agents (robustesse).

Quoi qu'il en soit et quelque soit la granularité des agents la coopération est un concept clé de l'Intelligence Artificielle Distribuée car, en tant que contrôleur des interactions, elle fait apparaître la notion d'émergence qui est de loin la plus recherchée lors de la conception de systèmes multiagents (Jean, 2002).

### III.2.2.b. ... Le Processus d'Emergence

De fait, l'émergence caractérise l'apparition de structures dynamiques ayant des propriétés différentes des règles initiales. Elle est considérée comme l'effet secondaire des interactions entre agents. Dans un premier temps, l'observateur constate la simplicité des agents et des mécanismes qui les composent, puis, une deuxième lecture permet de voir apparaître des informations nouvelles, qui ne sont absolument pas codées dans le premier niveau, mais dont le premier niveau est responsable. Cela est dû en grande partie aux itérations nombreuses dans le temps et dans l'espace et aux interactions locales entre agents (Müller, 1998 b).

Comme nous l'avons vu dans les derniers paragraphes (§III.2), ces interactions entre les individus du système peuvent être organisées et coordonnées de différentes façons et cela surtout dans le cas d'agents cognitifs capables dans la plupart des cas de planifier leurs actions. Il est alors plus simple de maîtriser ces phénomènes émergents bien que cela diminue l'impression d'observer un phénomène « magique », apparaissant « par surprise » (Ferber, 1995).

Cependant, selon Ferber (Ferber, 1995), « il est possible de considérer l'organisation du travail et la structuration des rôles comme des phénomènes qui émergent des interactions individuelles ».

La coopération peut être abordée de deux manières différentes selon que nous la considérons comme une attitude propre aux agents qui décident de travailler en commun ou que nous observons des phénomènes de groupe nous amenant à les qualifier de coopératif. En effet, les agents réactifs ne sont pas considérés comme ayant l'intention de coopérer. L'observateur interprète alors l'activité sociale, qui résulte des interactions entre agents, comme étant coopérative. Dans le cas d'agents cognitifs, ils seront capables de repérer les autres agents engagés dans le même but ; pour que l'agent coopère et réalise des travaux, il est alors nécessaire qu'il identifie un but commun. Si nous considérons les agents réactifs, nous avons affaire à des « indices de coopération » qui se mettent généralement en place naturellement. Ils sont observables et même quantifiables ce qui permet de s'affranchir totalement des représentations internes de l'agent. Ces agents « collaborent » (Ferber, 1994).

Nous avons déjà abordé le fait que l'objectif essentiel d'un système multi agents naturel ou artificiel est la survie au sens large du terme. C'est pour cela que les interactions poussent les agents à coopérer soit pour augmenter leurs performances de groupe soit pour éviter une chute trop importante de ces performances si les ressources sont limitées. Dans ce dernier cas, nous remarquons qu'ils sont dans une situation de résolution de conflits. Nous parlons alors de « coopération réactive » car les agents n'ont aucune représentation fidèle de leur environnement ni de ses occupants et vaquent à leur travail sans se soucier des autres et donc sans avoir conscience des conséquences de leurs actions sur leur environnement.

Cette capacité de survie, ce désir qui n'est qu'apparent et qui reste subjectif (car dépend de l'appréciation de l'observateur) peut être obtenu par des mécanismes simples comme le partage des ressources, le regroupement, la spécialisation ou la notion de prédateur. Ferber constate que « d'une manière générale, les systèmes complexes sont fondés sur une intégration des situations synergiques et conflictuelles, les premières assurant l'augmentation des performances, et les secondes permettant la sélection des agents concernés. » (Ferber, 1995)

Nous comprendrons que la notion d'émergence s'articule autour de celle de coordination. En effet, cette dernière facilite l'émergence de structures sociales, d'organisations et de comportements communautaires intégrés au fonctionnement global essentielles à la survie du groupe car favorisant l'amplification des performances individuelles ou collectives.

### **III.3. Limites des SMA et Simulation Orientée Agent (SOA)**

De la section précédente ressortent les préceptes et les principales idées qui sous-tendent la conception et la réalisation de systèmes multiagents. Nous avons vu les avantages d'utiliser le principe de distribution et de passer par des notions telles que la coordination pour résoudre, modéliser et simuler les problèmes relevant des systèmes complexes. La capacité des SMA de simplifier la manipulation conjointe de plusieurs niveaux de description suffit à répandre largement son utilisation.

Cependant, ces avantages ne vont naturellement pas sans leur lot d'inconvénients. Dans ce sens, nous allons développer un certain nombre de réflexions inspirées en grande partie des écrits d'Alexis Drogoul et al (Drogoul, Vanbergue, & Meurisse, 2003).

Effectivement, les SMA en tant que concept révèlent une grande hétérogénéité dans les domaines applicatifs qui se répercute inéluctablement sur les protocoles de la sémantique associée. En effet, l'un des problèmes souvent soulevé en matière de SMA est le manque (voire l'absence) de formalisme global de conception. Ce manque de méthode se reflète dans la diversité des agents computationnels rencontrés et dans les nombreuses architectures (pour ne pas dire spécifique). Toutefois, ce n'est pas de la mauvaise volonté de la part des chercheurs travaillant dans le domaine qui se sont proposés en grand nombre pour axiomatiser l'élaboration de SMA. Il existe en effet de nombreuses démarches, de nombreux procédés décrits dans la littérature (FIPA, KUML, AUML...). Cependant, leur nombre les rend difficiles à classer en grande famille et exprime l'apparente incapacité que la majeure partie des spécialistes ont à s'entendre sur l'une d'entre elle. Assurément, malgré l'effort synthétique produit, ces méthodes restent la plupart du temps développées en phase avec un domaine d'application précis.

Aussi, de nombreuses plates-formes ont vu le jour avec à nouveau chacune leurs spécificités (Swarm, MadKit, StarLogo, CORMAS, AgentBuilder, Jack, MASK, Zeus, etc...) (Ricordel, 2001). Quelles sont les réelles différences entre elles, et surtout comment cela se traduira dans le comportement du système ? Leur diversité est certes un atout, mais comment choisir une plate-forme pour un projet particulier, sur quels critères se baser ? Si nous ajoutons à cela l'hétérogénéité des langages employés, le choix devient vite un vrai casse-tête.

Résolument, il semble compliqué de dissocier les SMA de leur domaine d'application. Nous distinguerons donc le concept de systèmes multiagents, en tant que paradigme, de la notion de Simulation Orienté Agent (SOA) en tant que matérialisation de ce paradigme. Drogoul et al (Drogoul, Vanbergue, & Meurisse, 2003), nous exposent leur point de vue comme suit :

*« [...] la SOA autorise, en théorie, une diversité de représentations [...] importante [...]. Cette richesse est source de confusions pour beaucoup de thématiciens, et, souvent, de désillusions en cours de conception, dans la mesure où peu d'entre eux savent comment leurs connaissances seront traduites et interprétées informatiquement (cela peut dépendre de la plate-forme, de l'architecture du SMA, même du langage de programmation utilisé). »*

Il apparaît ici une notion très importante comprise dans le terme « thématicien<sup>1</sup> ». Une distinction implicite est faite entre les différents rôles que regroupent la conception, la modélisation et la réalisation d'une SOA. Assurément, thématiciens, modélisateur et informaticiens doivent pouvoir se comprendre dans le souci d'un objectif commun, en d'autres termes « pour savoir où chacun veut en venir ». Ces experts peuvent développer un langage commun afin d'acquiescer un « code » syntaxiquement compatible mais leurs démarches, assimilées au fil des années dans différents domaines, amènent fatalement des disparités sémantiques importantes.

Il faut alors s'assurer que la réalisation finale corresponde bien aux attentes des différents maillons intervenant dans la conception. Il faut également que tous s'entendent sur la définition de l'agent (aussi « faible » soit elle), sur les règles qui vont régir son comportement. Les points de vue sont très disparates sur le sujet et, bien souvent même, ils sont allégoriques en pratique. De fait, dans nombre de SOA rencontrés, les propriétés d'un agent telles qu'elles sont décrites dans les principes énoncés par l'IAD, ne sont pas traduites en propriétés computationnelles. « Les agents computationnels décrits en IAD ou en SMA ne sont tout simplement pas utilisés par la SOA » ajoute Drogoul.

Une solution ne réside pas forcément, dans un premier temps, dans la définition rigoureuse d'une méthode d'implémentation « orientée-agent » au sens propre du terme mais plutôt dans la nécessité d'adopter une démarche complète de la construction d'une Simulation Orientée Agents à partir du système réel jusqu'au système artificiel.

---

<sup>1</sup> Le **thématicien** est l'expert du domaine sur lequel porte la modélisation (cf. Glossaire)

Fishwick (Fishwick, 1995) ou encore Gilbert et Troitzch (Gilbert & Troitzsch, 1999) se sont attelés à ce type de description méthodologique reposant sur la répartition des tâches.

La première, mise en place par Fishwick (Fishwick, 1995), décrit le processus global de simulation comme un certain nombre d'itérations entre trois étapes, fondamentales et couplées les unes aux autres, qui sont la conception, l'exécution et l'analyse (Figure I.11). Le problème de cette description méthodologique est qu'il n'apparaît pas d'étape transitionnelle entre la conception et l'exécution, ce qui sous-entend que l'implémentation se fait naturellement, sans spécificités techniques autre que celle de calquer le modèle initié durant l'étape de conception. Cela semble bien entendu légèrement réducteur et il s'avère évident que la réalisation du modèle computationnel est un travail à part entière nécessitant des compétences particulières.

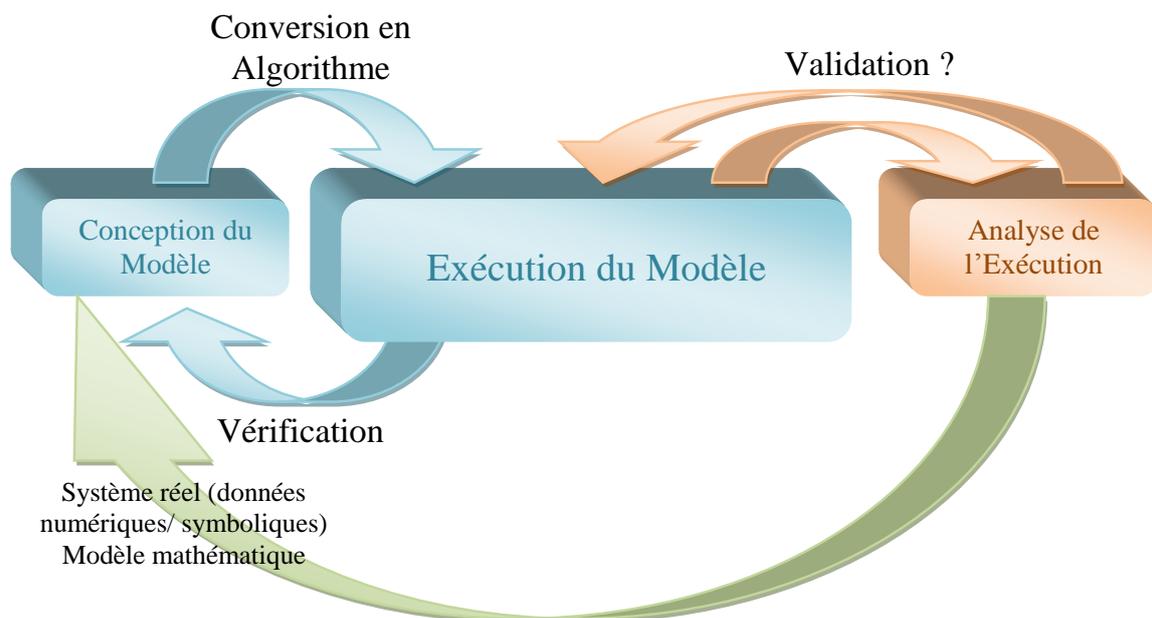


Figure I.11 : La Simulation Comme une Succession de Tâches (Fishwick, 1995)

Les seconds (Gilbert & Troitzsch, 1999) ajoutent qu'à l'heure actuelle, malgré l'existence et la possible utilisation de nombreux langages de programmation dédiés ou non à la simulation, son implémentation reste souvent spécifique et donc bien plus compliquée qu'il n'y paraît.

Ils distillent alors le modèle proposé par Fishwick en ajoutant une étape de « construction du modèle » par l'écriture d'un programme informatique « spécifique » (Figure I.12).

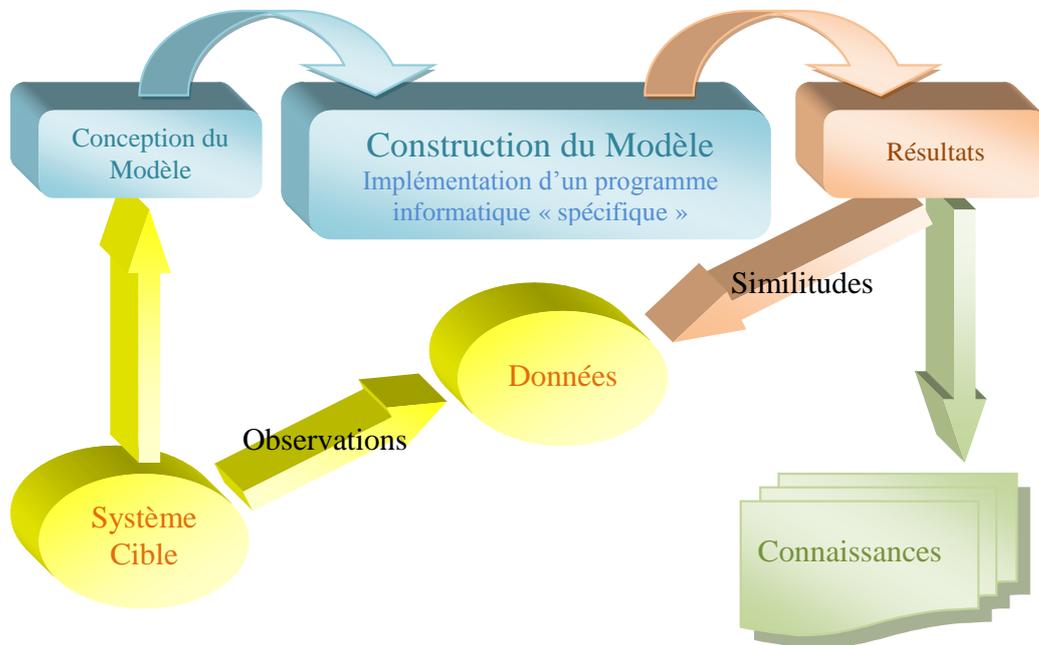


Figure I.12 : Proposition Méthodologique de Gilbert et Troitzsch (Gilbert & Troitzsch, 1999)

Ce diagramme n'apparaît pas dans Gilbert et Troitzsch, 1999 et est inspirée d'une interprétation faite par Drogoul et al. (Drogoul, Vanbergue, & Meurisse, 2003)

Cette solution a le défaut majeur (en plus de ne pas être spécifique à la conception de SOA) d'avoir une approche par les tâches alors que, pour comprendre les difficultés de traduction du modèle conceptuel en modèle computationnel, il faudrait adopter une approche orientée-modèle. En ce sens, nous remarquons qu'il est possible d'établir un cadre méthodologique général pour la conception de SOA en se reposant sur la distribution des rôles entre le thématique, le modélisateur et l'informaticien. Pour cela, il est intéressant de définir ces rôles dans les étapes de l'élaboration du modèle.

Le thématique est celui qui définit le problème en premier, c'est de lui que vient le besoin. Il pose le contexte et délimite le système à étudier en fonction de ses connaissances et de ses interrogations. Pour des soucis de commodité parfois dus à son domaine d'étude, il se positionne le plus souvent selon le couple réductionniste / holiste que nous avons préalablement détaillé.

De fait, il aura deux points de vue complémentaires : une optique locale lui permettant de définir les différents individus qui forment le système et qui constitueront les « agents conceptuels » de son modèle ; puis, une optique globale, tirée de son expertise, de ses observations ou relevant de la théorie, qui lui permettront principalement d'évaluer les résultats de la simulation. Grâce à ces connaissances, le thématicien peut concevoir un premier modèle que nous appelons « *modèle du domaine* » qui représente et explique le comportement des individus réels en évolution dans le système cible.

Le modélisateur réalise le débroussaillage de ces informations pour réaliser le « *modèle de conception* ». Il traduit de manière formelle les données spécifiques du domaine en un modèle considéré comme implémentable sans pour autant être d'ores et déjà transcrits informatiquement. C'est à ce niveau de la conception que les concepts développés en IAD sur les SMA sont employés afin de caractériser les propriétés des agents. C'est donc une étape cruciale et compliquée qui nécessite de pouvoir faire la transition entre le thématicien et l'informaticien. En outre, ce modèle de conception n'est pas finalisé d'emblée mais demande plusieurs itérations dans sa réalisation par un dialogue soutenue lors de la conception du « modèle du domaine » comme de celui réalisé par l'informaticien.

Précisément, le rôle de l'informaticien est en grande partie de transcrire en lignes de code le modèle de conception. Cependant, si la diversité des plates-formes et des langages lui montre l'étendue des possibilités que lui offre l'implémentation, elle le contraint également à mettre en place un modèle de transition entre l'implémentation et le modèle réalisé par le modélisateur. Ce modèle est appelé « modèle opérationnel » et revient à décrire le système virtuel en termes computationnels, c'est-à-dire en envisageant les agents comme technique d'implémentation (comme les objets par exemple). Ce modèle permet et facilite par la suite la modification du code en fonction des aspirations et des contraintes de chacun. La réalisation de ce modèle est donc essentielle et précède la conception effective du système computationnel.

Le cadre méthodologique « complet » (Figure I.13), défini par les trois rôles énoncés est résumé par le schéma ci-dessous (Drogoul, Vanbergue, & Meurisse, 2003).

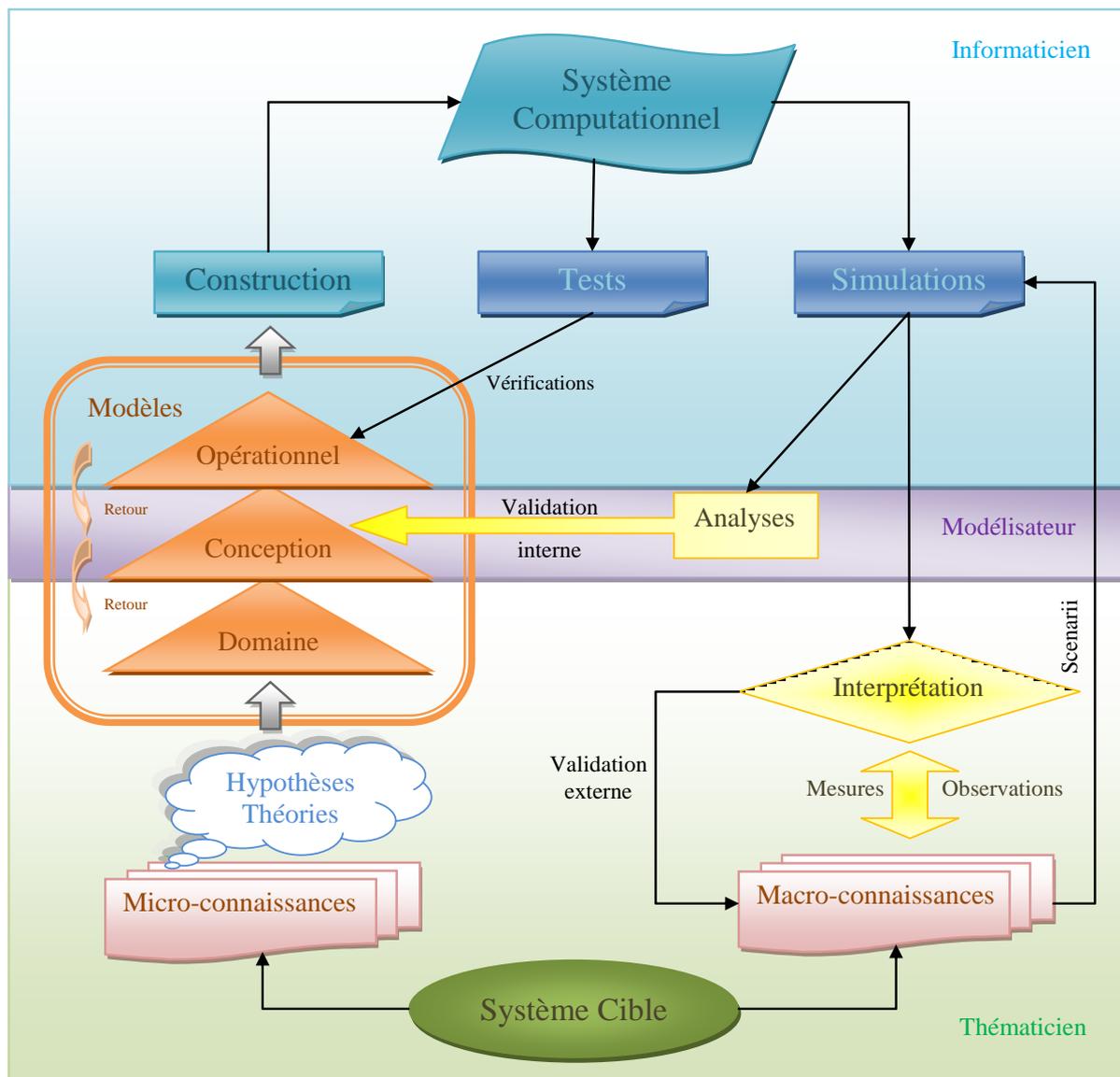


Figure I.13 : Cadre Méthodologique « Complet » (Drogoul, Vanbergue, & Meurisse, 2003)

Sur la partie de gauche du schéma, nous voyons la partie ascendante correspondant à la conception et à la réalisation du système computationnel en partant des micro-connaissances du thématicien telles qu'exposées plus haut. Chaque section colorée correspond à la part de travail réalisée par chacun des protagonistes évoqués. Dans la réalité des faits, ces trois rôles sont bien souvent fictifs car réalisés par une voire deux personnes, mais elles permettent de caractériser des étapes précises dans la conception du système virtuel.

Nous remarquons une section supplémentaire qui correspond à toute la démarche descendante. Elle est également réalisée par les trois rôles définis et montre un cheminement possible de validation par l'élaboration de scénarii. Cette validation constitue également un frein dans l'utilisation des SOA tant elle peut être compliquée à réaliser pour les experts et cela pour deux raisons principales.

La première concerne le fait que les systèmes conçus ont parfois une complexité s'approchant de leurs homologues naturels et permettant alors principalement de réaliser des expérimentations rapides en fonction de groupes de données (entrées, contraintes, paramètres, Figure I.3 : Le Modèle) qui permettent d'avoir une idée de la réponse du système à court terme ou plus rarement de son évolution à long terme.

La seconde est directement en relation avec les connaissances du thématicien et plus particulièrement avec sa connaissance globale du système qui est souvent l'objet même de la conception de la SOA.

Nous touchons ici à la notion de système d'aide à la décision qui est la vocation première d'une SOA. Si il est difficile de valider de telles simulations, nous ne pouvons pas affirmer qu'elles nous apprennent réellement quelque chose sur le système cible, ce qui est pourtant l'objectif essentiel d'un modèle (Cf. I.1 Système, Modèle et Simulation). Il paraît alors nécessaire de progresser dans l'élaboration de systèmes d'analyse de niveau supérieur plus poussés permettant une compréhension approfondie de l'évolution du système cible. Nous irons dans ce sens au Chapitre III en proposant d'apporter un outil d'aide à la décision autonome réalisant la supervision d'un système computationnel dont nous verrons la réalisation au Chapitre II. Il s'agit de réaliser le monitoring de la SOA de façon automatique afin d'apporter au thématicien un véritable système d'assistance dans l'interprétation des causes d'événements émergents.

# Intercalaire Ch.I → Ch.II : Du Concept à l'Application

---

Le premier chapitre nous a permis de comprendre quels sont les enjeux de la vision systémique et son intérêt dans l'étude des systèmes complexes. Afin de réaliser la modélisation de ces systèmes, la notion de simulation s'est avérée être d'une grande importance. Dans ce sens, nous avons également abordé les concepts (initiés par l'étude de comportements sociaux trouvés dans la nature) soutenus par l'IA et la VA. Ces sciences apportent des principes et une démarche pouvant être appliqués à l'étude et à la modélisation de systèmes complexes. Nous avons notamment approfondi les possibilités qu'offrent les SMA qui se sont avérés être un outil particulièrement adapté aux attentes précises que demande la réalisation d'abstractions de systèmes naturels. De fait, cette technique de simulation offre de nombreux avantages, mais, également, son lot d'inconvénients. Plus particulièrement, nous avons évoqué les contraintes rencontrées tout au long de la réalisation de SOA et dues à la distribution du travail entre thématicien, modélisateur et informaticien. En outre, la difficulté à analyser et à valider les simulations issues de ces techniques a montré la nécessité d'apporter un outil d'aide à la décision *autonome*, capable de réaliser une première analyse du système considéré.

A travers le chapitre II, nous allons étudier la SOA que nous avons réalisée en utilisant les techniques développées dans le chapitre I. L'application que nous avons choisie s'attache au domaine de la biologie, plus particulièrement de l'épidémiologie. Nous souhaitons modéliser et analyser la circulation de flux de parasites dans un écosystème. Cette étude a pour vocation de procurer, aux thématiciens du domaine, un outil d'aide à la décision dans l'objectif d'éviter une pandémie due à la dissémination du parasite. Ainsi, nous voulons comprendre et, à plus forte raison, maîtriser sa propagation en apportant un outil d'expérimentation capable de tester différentes configurations du système afin d'en évaluer les répercussions.

---

<b>CHAPITRE I OUTILS POUR LA MODELISATION ET LA SIMULATION .....</b>	<b>27</b>
I. SYSTEME ET MODELE : LIMITES DES METHODES USUELLES.....	27
II. SYSTEMES COMPLEXES ET PRINCIPE DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE DISTRIBUEE .....	44
III. LES SYSTEMES MULTIAGENTS : SMA .....	65
<b>CHAPITRE II GESTION DE FLUX PAR SYSTEMES MULTIAGENTS : APPLICATION EN EPIDEMIOLOGIE .....</b>	<b>86</b>
I. ECHANGES DANS LES SYSTEMES.....	86
II. LE PROBLEME EPIDEMIOLOGIQUE.....	91
III. MODELISATION DE LA CIRCULATION DE CRYPTOSPORIDIUM.....	112
IV. SIMULATION ET VALIDATION .....	136
V. EVOLUTIONS DU MODELE.....	147
VI. SYNTHESE : SOA ET GESTION DE FLUX.....	162
<b>CHAPITRE III MONITORING DE SIMULATION ORIENTEE AGENTS .....</b>	<b>167</b>

# Chapitre II Gestion de Flux par Systèmes Multiagents : Application en Epidémiologie

## *I. Echanges dans les Systèmes*

Dans le Chapitre I, nous avons abordé les notions concernant les systèmes complexes et la nécessité de distribuer l'information pour mieux appréhender ces systèmes. Nous avons également remarqué que la plupart des systèmes qui nous entourent, regroupent un nombre important d'entités en interaction. Cette propriété est l'un des critères récursivement retenus pour les classer dans la catégorie des systèmes complexes ; cette caractéristique conditionne d'ailleurs souvent l'approche choisie pour les modéliser alors qu'elle n'est pas nécessaire à leur définition.

Nombre de modèles linéaires sont utilisés pour représenter divers systèmes. Alors pourquoi utiliser des méthodes distribuées, utilisant parfois des principes non linéaires<sup>2</sup> souvent plus compliquées à mettre en œuvre, pour modéliser les systèmes naturels ? Nous allons voir qu'il s'agit avant tout de la manière d'envisager les échanges qui s'y déroulent.

De fait, le principe de causalité est au cœur de l'approche linéaire. C'est lui qui rend les systèmes prévisibles. Toute action sur le système induit une réaction plausible. Les mêmes causes produisent les mêmes effets et des causes voisines produisent des effets voisins. Si les conditions initiales d'un système sont établies et si sa dynamique est bien connue, il est relativement facile de prévoir son état futur. Il est alors possible d'exercer une action précise pour obtenir un effet désiré. Bien sûr, l'approche linéaire utilisée dans la modélisation des systèmes n'est pas aussi simple et des équations mathématiques, aussi variées que nombreuses, ont été développées pour tenir compte des multiples facteurs qui influencent les systèmes naturels.

---

<sup>2</sup> Nous nommons ici **effets non linéaires**, des effets qui ne se produisent pas de façon *directement proportionnelle* à l'action. C'est le cas de la plupart des effets du monde réel, et la raison de la difficulté à reproduire fidèlement des informations par des techniques analogiques.

Cependant, comme le dit Prigogine, l'approche non-linéaire est « la fin de ces certitudes » (Prigogine, 1996).

Un système fermé représente un système isolé, constitué d'un nombre plus ou moins important de corps en interaction. Bien que nous ayons vu qu'un système fermé n'a pas une signification vraiment réaliste car nous ne pouvons considérer qu'un système soit totalement isolé, ce type de systèmes montre bien à quel point les interactions sont importantes. En effet, certains scientifiques étaient convaincus que toute perturbation d'un tel système ne pouvait provenir que de propriétés exogènes.

Pourtant, dès la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, le mathématicien français Henri Poincaré fit une découverte déconcertante : dans un système fermé, en passant simplement de deux à trois corps (en l'occurrence, en tenant compte de l'influence du Soleil sur le système Terre-Lune), les équations de Newton deviennent insolubles. Pour des raisons mathématiques, leur solution nécessite une série d'approximations pour «cerner» une réponse. Jusqu'à Poincaré, ces considérations à la base de la théorie du chaos avaient toujours été considérées comme une conséquence de perturbations provenant de l'extérieur ; désormais, il apparaît qu'un système même « enfermé dans une boîte étanche » peut développer ses propres instabilités en particulier à cause des rétroactions entre ses composantes.

En effet, dans un système, une rétroaction négative opère une régulation tandis qu'une rétroaction positive effectue davantage une amplification. Ces phénomènes non linéaires sont une des clés de la compréhension du comportement des systèmes complexes. Des choses sans importance apparente peuvent avoir une influence immense, car de petits effets peuvent être amplifiés et vice-versa sous la contrainte des diverses interactions entre les entités du système.

Nous envisageons alors l'étude des systèmes naturels comme l'étude de systèmes complexes de par le fait que nous considérons les interactions entre les participants à leur évolution comme étant non triviales (Huston, DeAngelis, & Post, 1988). Chaque entité peut interagir à tout moment avec une autre de façon unique, induisant une réponse unique ainsi qu'une répercussion originale sur l'avenir du système.

Les échanges ayant lieu dans les systèmes étudiés sont donc primordiaux ; ils représentent souvent l'objet de l'étude en question et la justification de l'utilisation de méthodes distribuées comme les systèmes multiagents pour leur modélisation.

Comme nous l'avons remarqué au chapitre précédent, ces interactions sont l'occasion de communications entre les entités concernées. Différents éléments sont échangés à distance ou lors de contacts entre les individus autant qu'avec l'environnement. Ces données peuvent être tout simplement des informations sur l'état du système à un endroit et à un moment donné mais peuvent aussi prendre une forme plus concrète (nourriture, phéromones, etc...) comme dans le cas des insectes sociaux par exemple. Nous pouvons alors imaginer que ces données représentent également des entités pathogènes dans le cas de maladies nosocomiales ou encore des fonds monétaires entre acteurs économiques. Dans les cas que nous venons d'énumérer, il existe une séquence continue de données qui est transmise d'un point à un autre d'un réseau de communication. Ces échanges s'apparentent donc à des flux comme ceux qui existent sur les réseaux informatiques.

Le mot *flux* (du latin *fluxus*, écoulement) désigne en générale un ensemble d'éléments (informations/données, énergie, matière, etc...) évoluant dans un sens commun. C'est alors l'analyse des flux évoluant dans les systèmes complexes sur laquelle notre étude est portée. En particulier, nous nous sommes attardés sur les flux induits par la propagation d'un parasite dans un écosystème : *Cryptosporidium*.

*Cryptosporidium* est un parasite intestinal pouvant être mortel et qu'il est difficile de combattre efficacement. Aujourd'hui, les techniques de biologie moléculaire permettent d'avancer dans la détection et l'identification des espèces de *Cryptosporidium* sur des prélèvements d'origine humaine ou environnementale. Cette analyse permet ainsi la caractérisation des variétés de *Cryptosporidium*.

Cependant, il est nécessaire, en parallèle de ces recherches, de progresser dans la compréhension de la circulation du parasite au sein des écosystèmes. Ainsi, l'étude et la limitation des flux de parasites entre les individus d'un système permettent d'enrayer la pandémie<sup>3</sup> en limitant le nombre de cas pathologiques susceptibles de transmettre *Cryptosporidium*.

L'eau joue un rôle majeur dans la propagation et l'apparition des épidémies à *Cryptosporidium*. Nous avons donc conçu une simulation informatique permettant de mieux comprendre la circulation d'un parasite véhiculé par l'eau dans un environnement donné. Nous nous sommes également focalisés sur le rôle des insectes dans la dissémination du parasite. L'informatique représente ici un outil pour aborder la traçabilité d'un tel pathogène dans l'environnement.

L'élaboration d'un modèle bioinformatique de circulation parasitaire permet d'aborder selon divers paramétrages, une simulation des épisodes d'infection auprès des populations d'hôtes (animales ou humaines) fréquentant un écosystème donné. Ainsi, il est possible d'observer et d'agir sur la circulation du flux au travers de scénarii représentant des configurations initiales précises et successives du système permettant de tester sa réaction. Cette suite de scénarii, de mise en situation, est destinée à montrer que la simulation est en accord avec la réalité et permet d'installer une démarche logique afin de valider, par l'observation de l'évolution du système, les hypothèses faites sur les causes majeures de la dissémination du parasite.

La mise en place de ce travail a nécessité la complémentarité de compétences multidisciplinaires et interdisciplinaire nécessitant une collaboration importante entre des groupes de recherche d'horizons différents.

---

<sup>3</sup> Une pandémie est une épidémie qui s'étend à la quasi-totalité d'une population considérée.

Nous pouvons citer en particulier le Laboratoire E&S (Environnement et Santé) de la Faculté Libre des Sciences et Technologies de Lille (FLST) qui a apporté le savoir nécessaires pour remplir le rôle du « thématicien » ; leurs compétences en biologie et en épidémiologie ont été associées à celle de l'Institut Pasteur de Lille dans l'objectif d'obtenir les données nécessaires à la réalisation de notre projet.

En ce qui concerne les rôles de modélisateur et d'informaticien, ils ont été assurés essentiellement par deux groupes de recherche : le LAGIS de l'Ecole Centrale de Lille (Laboratoire d'Automatique, Génie Informatique et Signal, UMR CNRS 8146) et par l'Equipe de Recherche en Automatique des Systèmes et Microsystèmes de l'école des Hautes Etudes d'Ingénieur (ERASM-HEI). Nous avons cherché ensemble une façon de représenter, de modéliser la circulation de ce parasite dans un écosystème afin de comprendre comment il se développe sous des contraintes spécifiques et de savoir dans quelle mesure il peut affecter un groupe d'individus selon la façon dont il est introduit.

Etant donné que *Cryptosporidium* est particulièrement résistant aux méthodes de désinfection traditionnelles, cela doit permettre de saisir les facteurs prédominants agissant dans la contamination des hôtes et la propagation du parasite dans le but de limiter sa prolifération par des moyens autres qu'en le combattant directement.

Dans la suite, nous verrons d'abord quelles sont les spécificités de *Cryptosporidium* et quelles sont les informations que les « thématiciens » (i.e. les biologistes) nous ont procurés sur le parasite afin de pouvoir construire le modèle et choisir les niveaux d'abstraction et de détail associés. Puis, dans la partie suivante, nous étudierons l'élaboration du modèle, sa mise en œuvre et enfin sa validation ainsi que les problèmes que cela comporte.

## II. Le Problème Epidémiologique

Le genre *Cryptosporidium* rassemble plusieurs espèces de protozoaires parasites intestinaux<sup>4</sup>, induisant des infections allant de la forme asymptomatique à la gastro-entérite avec des complications parfois mortelles pour les patients immunodéprimés<sup>5</sup>. La maladie induite prend alors le nom de cryptosporidiose et représente un danger non négligeable notamment dans le domaine de l'élevage mais aussi dans celui de la santé publique. Cette parasitose peut en effet entraîner la mort d'animaux ou d'humains aux défenses immunitaires affaiblies. Actuellement, la façon dont *Cryptosporidium* sp.<sup>6</sup> circule dans l'environnement est mal connue ; les études qui s'intéressent à cette question nécessitent la mise en place de méthodes de détection du parasite qui soient fiables et sensibles. De plus, les protistes<sup>7</sup> parasites du genre *Cryptosporidium* sont des contaminants de l'eau. Sachant que les stations d'épuration n'éliminent en moyenne que les trois quarts des parasites, de nombreux oocystes<sup>8</sup> potentiellement infectants peuvent ainsi passer dans les eaux de consommation comme dans les eaux de baignade.

---

<sup>4</sup> «**°Protozoaire parasite intestinal** » : Cela signifie qu'il s'agit d'un animal unicellulaire (protozoaire) ayant besoins de tirer profit d'un hôte pour sa survie (parasite) et se développant dans l'intestin de cet hôte (intestinal).

<sup>5</sup> L'**immunodépression**, ou **immunodéficienc**e, caractérise un état dans lequel une personne voit ses défenses immunitaires affaiblies. On distingue l'immunodéficienc

<sup>6</sup> « **sp** » : Dans de nombreux cas en biologie, seul le genre de l'animal peut être identifié, mais non l'espèce. Celle-ci est alors désignée par le nom du genre puis par le mot latin species, qui signifie « espèce », et dont l'abréviation est sp. ou spp. au pluriel.

<sup>7</sup> **Protiste** = Protozoaire = Unicellulaire (donc de petite taille).

<sup>8</sup> Les **Oocystes** sont une forme capsulée sous laquelle les parasites sont excrétés du tube digestif. Les oocystes, sorte d'œufs, ne sont pas immédiatement infectants après l'excrétion mais peuvent le devenir après 2 ou 3 jours en présence d'humidité et de chaleur.

*Cryptosporidium* sp. a été identifié, dans un premier temps, chez des animaux d'élevage (bovins, ovins, caprins) et depuis plus d'une vingtaine d'années, son rôle pathogène a également été démontré chez l'homme (Follet, 2005). Les cas cliniques rapportés dans la littérature restent rares jusque dans les années 80. La pandémie de SIDA et la multiplication des cas d'immunodépression dus à d'autres causes ont entraîné le développement de nombreux cas de cryptosporidiose, révélant ainsi le statut opportuniste du parasite.

Il faudra attendre 1993, avec l'épidémie de Milwaukee aux USA (403 000 personnes atteintes) (Mac Kenzie, et al., 1994) pour que les institutions de santé publique, les groupes agricoles et environnementaux ainsi que les agences de distribution d'eau s'intéressent au problème. En France, la réglementation n'impose pas de valeur limite quant à la présence d'oocystes dans l'eau, la seule exigence est que l'eau ne doit pas contenir un nombre ou une concentration de parasites constituant un danger potentiel pour la santé des personnes. Il est alors important de développer des travaux basés sur la biologie de *Cryptosporidium* ainsi que les moyens de détection, de prévention et de traitement. Pour les mêmes raisons, il est essentiel de comprendre parallèlement comment le parasite est véhiculé, comment il circule et se dissémine. Dans cette optique, la suite nous expose les spécificités de *Cryptosporidium* que notre travail avec les biologistes nous a permis de retenir afin de comprendre comportement du parasite.

## II.1. *Cryptosporidium* : Spéciation<sup>9</sup>

Les cryptosporidies ont longtemps été définis comme spécifiques de l'espèce hôte qu'elles parasitaient. Ainsi, la découverte de tels parasites chez une espèce vertébrée amenait à la création d'une nouvelle espèce. En 2000, plus d'une vingtaine d'espèces de *Cryptosporidium*, essentiellement basées sur cette spécificité d'hôte, étaient répertoriées dans la littérature (Morgan, Xiao, Fayer, Lal, & Thompson, 1999; Xiao, Morgan, Fayer, Thompson, & Lal, 2000).

---

<sup>9</sup> En biologie, la **spéciation** est le processus évolutif par lequel de nouvelles espèces vivantes apparaissent.

Actuellement, environ vingt-cinq espèces de *Cryptosporidium* ont été décrites en fonction de l'hôte infecté. Les plus récentes études estiment à 13 le nombre d'espèces de *Cryptosporidium* considérées comme valables (Tableau II.1).

Espèces	Hôtes principaux	Sites d'infection prédominant
<i>C. andersoni</i>	Veaux; Chameaux	Estomac
<i>C. baileyi</i>	Oiseaux (Poulets)	Cloaque, Bourse de Fabricius, Trachée
<i>C. canis</i>	Chiens	Intestin
<i>C. felis</i>	Chats	Intestin
<i>C. galli</i>	Oiseaux (Poulets)	Gésier, Estomac
<i>C. hominis</i>	Hommes	Intestin
<i>C. meleagridis</i>	Oiseaux (Dindes)	Intestin
<i>C. molnari</i>	Poissons	Estomac, Intestin
<i>C. muris</i>	Rongeurs	Estomac
<i>C. parvum</i>	Mammifères	Intestin
<i>C. saurophilum</i>	Lézards	Intestin
<i>C. serpentis</i>	Reptiles	Estomac
<i>C. wrairi</i>	Cobayes	Intestin

Tableau II.1 : Hôtes et Sites d'Infection des Espèces Etablies de *Cryptosporidium* (Xiao, Fayer, Ryan, & Upton, 2004)

*Cryptosporidium parvum* est l'espèce la plus communément utilisée dans les laboratoires de part son aspect pathogène pour l'homme et l'animal domestique. *C. parvum* est infectieux pour une grande variété de mammifères et un grand nombre d'oocystes peut être obtenus, principalement à partir de jeunes ruminants. Les bovins, les chèvres et les moutons nouveau-nés sont les plus touchés et par conséquent les plus utilisés pour la production en masse d'oocystes de *Cryptosporidium* destinés aux tests en laboratoire.

Certains travaux suggèrent une forte spécificité d'hôte (Graczyk, Fayer, & Cranfield, 1996; Graczyk & Cranfield, 1998; Lindsay, Blagburn, & Sundermann, 1986). Toutefois, d'autres études ont mis en évidence un passage possible de certaines espèces de *Cryptosporidium* d'une espèce-hôte à une autre<sup>10</sup> et l'outil moléculaire a permis de mettre en évidence une hétérogénéité importante parmi les isolats provenant de différents vertébrés (Follet, 2005). Cela reflète la complexité et l'ambiguïté du genre *Cryptosporidium*.

De fait, la difficulté à différencier les espèces par les différences morphologiques rendent compte de l'importance de comprendre comment *Cryptosporidium* circule dans un écosystème. Pour cela, il est essentiel de saisir comment le parasite se multiplie et surtout de quelle manière il affecte son hôte.

## **II.2. Épidémiologie de la Cryptosporidiose**

### ***II.2.1. Cycle Biologique de Cryptosporidium sp.***

Les oocystes<sup>8</sup> du genre *Cryptosporidium* sont des éléments sphériques. Leur taille est comprise entre 4 et 7 µm de diamètre selon l'espèce incriminée. C'est cette petite taille qui leur permet de passer au travers des filtres des stations d'épuration. Ils sont localisés dans la lumière intestinale. Les oocystes à paroi épaisse (double paroi) sont l'aboutissement du cycle sexué et sont excrétés dans les selles des malades. Emis dans l'environnement, ils sont directement infectants et assurent la dissémination de la maladie.

---

<sup>10</sup> Des exemples de transmissions à partir de *C. parvum* (espèce des mammifères) ont été décrits chez des agneaux (Giles, Webster, Marshall, Catchpole, & Goddard, 2001; Tzipori, Angus, Campbell, & Gray, 1982; Tzipori, Angus, Gray, Campbell, & Allan, 1981 a), des porcelets (Tzipori, McCartney, Lawson, Rowland, & Campbell, 1981 b) et des chats (Parlasek, 1983). Des infections de poulets ont été étudiées à partir de *Cryptosporidium* isolés de dindes (Lindsay, Blagburn, & Hoerr, 1987; Lindsay, Blagburn, Sundermann, & Hoerr, 1989; O'Donoghue, Tham, de Saram, Paull, & McDermott, 1987) mais aussi de veaux (Parlasek, 1983). Des infections de poissons à partir de *C. parvum* ont également été testées (Freire-Santos, Vergara-Castiblanco, Tojo-Rodriguez, Santamarina-Fernandez, & Ares-Mazas, 1998). De plus, des cas d'infections naturelles par *C. felis*, *C. muris*, *C. meleagridis* et *C. canis* ont été retrouvés chez l'homme (Guyot, et al., 2001; Pedraza-Diaz, Amar, & McLauchlin, 2000; Xiao, et al., 2001).

La Figure II.1 reprend le cycle biologique du parasite selon lequel il se multiplie. Nous développons ensuite ce cycle en expliquant chaque étape.

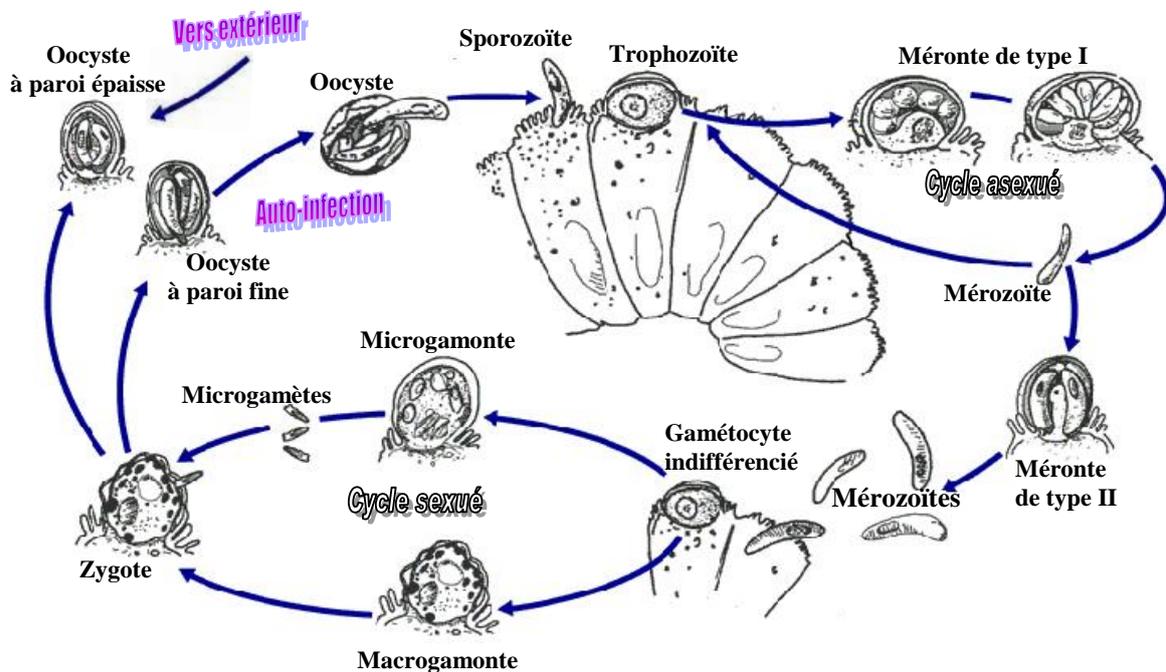


Figure II.1 : Cycle Biologique de *Cryptosporidium parvum* d'après Heyworth MF (Heyworth, 1992)

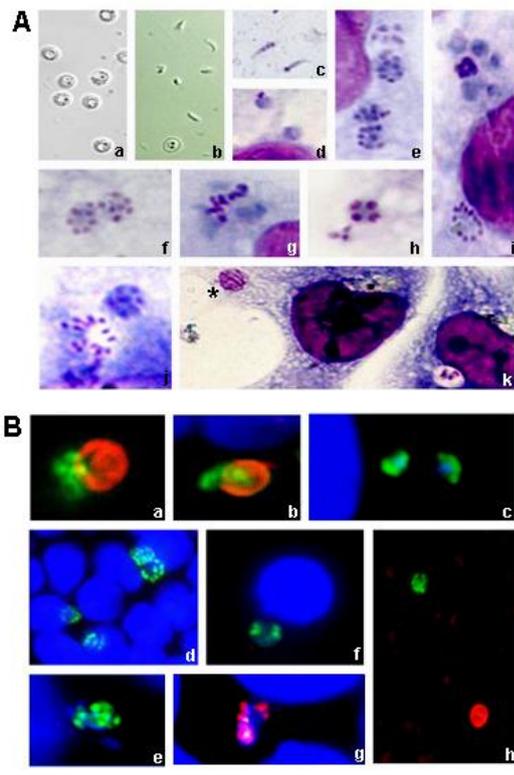
A partir d'un oocyste, quatre sporozoïtes sont libérés et parasitent les microvillosités<sup>11</sup> des cellules épithéliales intestinales ou des cellules respiratoires de leur hôte. Ces sporozoïtes adhèrent à la surface des cellules épithéliales. Ils invaginent la membrane cellulaire pour créer une sorte d'alcôve ou d'excroissance cellulaire appelée vacuole parasitophore, devenant ainsi un parasite intracellulaire. Chaque sporozoïte se différencie en trophozoïte puis méronite. La multiplication asexuée, appelée mérogonie, résulte de la division des méronites, donnant ainsi naissance aux mérozoïtes.

<sup>11</sup> Les **microvillosités** sont de fins prolongements cellulaires de forme cylindrique d'environ 1 micromètre de long. Ce type de structure permet une optimisation de la surface d'échanges impliqués dans le processus d'absorption, en l'occurrence au niveau intestinal ou respiratoire.

Les mérozoïtes de première génération, issus des mérontes de type I (à 8 noyaux) pénètrent à l'intérieur de nouvelles cellules hôtes. Ces mérozoïtes sont alors capables de produire de nouveaux mérontes de type I ou d'évoluer vers des mérontes de seconde génération (type II) contenant quatre mérozoïtes. Les mérozoïtes en question issus de cette dernière génération subissent, à l'intérieur des cellules, une différenciation sexuelle pour donner naissance à des macrogamontes ou à des microgamontes. La fécondation a lieu dans la cellule épithéliale suite à la libération de microgamètes<sup>12</sup> par les microgamontes et à l'union des macrogamontes et des microgamètes. Le zygote<sup>13</sup> ainsi formé sécrète une paroi pour donner un oocyste. Deux types d'oocystes peuvent alors être distingués : les oocystes à paroi « épaisse » qui seront émis vers le milieu extérieur et les oocystes à paroi « fine » qui ne sont jamais observés dans les selles ou dans l'environnement. Mis en cause dans le cycle d'auto-infection, ces derniers libèrent leurs sporozoïtes dans l'intestin du sujet infecté. Ils prolongent ainsi la durée de l'infection. Ci-contre quelques photos de *Cryptosporidium parvum*

reprenant son cycle de développement que nous venons de détailler.

Figure II.2 : Photos du Développement de *Cryptosporidium parvum* (Follet, 2005)



A : (a) Oocystes b) Sporozoïtes avant inoculation d'une cellule (c) Sporozoïtes 2h30 post inoculation (p.i.) (d) Trophozoïtes 24h p.i. (e-f) mérontes Type I 24h and 48h p.i. (g) Mérozoïtes enkystés de méronte 48h p.i. (h) mérontes Type II 48h p.i. (i) mérontes Type II et microgamontes 72h p.i. (j) méronte et microgamonte 96h p.i. (k) oocystes 1 semaine p.i.

B : (a-b) Sporozoïtes apparaissant sous la forme de bananes vertes fluorescentes. Oocysts apparaît sous la forme d'un point rouge fluorescent. (c) Trophozoïtes 24h p.i. (d-e) mérontes Type I 24h and 48h p.i. (f) mérontes Type II 48h p.i. (g) Stade atypique du développement 48h p.i. (h) mérontes Type I et oocyste 1 semaine p.i.

<sup>12</sup> Un **gamète** est une cellule reproductrice de type haploïde. Une cellule biologique est **diploïde** lorsque les chromosomes qu'elle contient sont présents par paires (**2n** chromosomes). A l'inverse, **haploïde** est un terme désignant les cellules avec des chromosomes en simple exemplaire (**n** chromosomes).

<sup>13</sup> Un **zygote**, ou cellule œuf, est une cellule diploïde résultant de la réunion de deux gamètes haploïdes par le processus de fécondation.

### *II.2.2. Aspect Clinique de la Cryptosporidiose*

La période d'incubation chez l'Homme s'étend entre 2 et 14 jours.

Chez l'hôte immunocompétent, les symptômes les plus courants sont des diarrhées abondantes et aqueuses (de 3 à 10 selles par jour pendant 3 à 12 jours), des douleurs abdominales, des nausées et vomissements, éventuellement une fièvre modérée (Datry, 1995). Il peut s'en suivre une perte de poids, mais la guérison spontanée intervient en moins de 3 semaines. Une personne apparemment guérie peut cependant continuer à excréter des oocystes de façon asymptomatique pendant plusieurs semaines.

Selon les facteurs individuels de l'hôte, la cryptosporidiose peut être plus ou moins sévère. Ainsi, les enfants en bas âge sont les plus souvent atteints par cette pathologie (Casemore, 1993). Le jeune âge et la malnutrition sont des facteurs aggravants pouvant être à l'origine d'une déshydratation sévère nécessitant une réhydratation parentérale<sup>14</sup>. Chez l'hôte immunodéprimé, la sévérité de l'infection dépend du degré d'immunodépression des patients. Dans le cas de déficits immunitaires importants, l'infection est chronique et sévère (Flanigan, et al., 1992; Pozio, et al., 1997). Chez les sidéens notamment, la cryptosporidiose peut fréquemment évoluer vers une forme chronique grave : les diarrhées s'aggravent progressivement et la perte de poids peut atteindre 50% du poids initial. De même, l'affaiblissement des défenses immunitaires favorise l'extension de la maladie à d'autres épithéliums que l'épithélium intestinal. Ainsi, chez des individus fortement immunodéprimés, une dissémination extra-intestinale du parasite est possible.

---

<sup>14</sup> L'administration faite au moyen d'une injection est appelée voie **parentérale**, en opposition à la voie entérale qui désigne l'administration faite par l'intermédiaire du tube digestif. La **nutrition parentérale** apporte une alimentation complète diffusée par une perfusion d'un soluté hypertonique dans un tronc veineux à débit élevé.

Il n'existe actuellement aucun traitement spécifique réellement efficace contre la cryptosporidiose. Seul un traitement symptomatique par des antidiarrhéiques peut être prescrit dans les cas les plus critiques, toujours associé à une réhydratation et parfois une alimentation parentérale<sup>14</sup>. Cependant, chez les patients immunodéprimés, l'efficacité des médicaments reste très variable en fonction des individus.

### II.3. Dispersion et Transmission de la Cryptosporidiose

*Cryptosporidium* sp. est un pathogène largement répandu au sein de la faune sauvage et chez les jeunes enfants. Nous avons vu que, chez l'homme, l'infection par *Cryptosporidium* est généralement décrite comme maladie opportuniste<sup>15</sup>. Le parasite représente, en effet, une menace pour les patients sidéens ou immunodéprimés. Cependant, des études menées dans les années 90 montrent l'importance de ce parasite comme une cause de gastroentérite sporadique mais importante chez des sujets immunocompétents, en particulier chez des enfants (Bretagne, Jacovella, Breuil, Guillot, Liance, & Houin, 1990).

La cryptosporidiose est une maladie à mode de transmission féco-orale. L'ingestion d'une quantité relativement faible d'oocystes suffit pour installer l'infection. D'après les résultats de recherches publiées, la dose minimale infectante chez les animaux varie entre 10 et 100 oocystes (Ernest, Blagburn, Lindsay, & Current, 1986).

Le risque de contracter une infection à *Cryptosporidium* varie également selon la réceptivité de l'hôte potentiel qui est fonction de son âge, de son état immunitaire, des antécédents d'exposition et d'autres facteurs génétiques et environnementaux.

---

<sup>15</sup> Une **maladie opportuniste** est une maladie due à des germes habituellement peu agressifs mais qui sont susceptibles de provoquer de graves complications en affectant des personnes ayant un système immunitaire très affaibli.

### *II.3.1. Les Animaux et la Dispersion de Cryptosporidium*

La présence de *Cryptosporidium parvum* est décrite chez les mammifères domestiques (bovins, caprins, ovins, chevaux, porcs, chiens et chats) et chez certains mammifères sauvages (sangliers, cervidés, rongeurs). Les données épidémiologiques concernant la cryptosporidiose chez l'animal sont étroitement liées à l'importance économique du bétail, particulièrement les ruminants.

Pour cette raison, nous allons nous focaliser par la suite sur les animaux d'élevage et plus particulièrement sur l'espèce bovine.

En effet, dans les troupeaux de zones d'élevage, une fréquence élevée du parasite est mise en évidence (Tableau II.2). Les données du Tableau II.2 montrent la diversité des élevages atteints et la présence de l'infection sur les différents continents. Les prévalences<sup>16</sup> les plus élevées sont observées chez les animaux les plus jeunes, jusqu'à 81% pour de jeunes veaux et 59% pour des agneaux en Espagne ou encore plus de 30% pour des chevreaux au Sri Lanka.

---

<sup>16</sup> En épidémiologie, la **prévalence** est une mesure de l'état de santé d'une population à un instant donné. Pour une affection donnée, elle est calculée en rapportant à la population totale, le nombre de cas de maladies présents à un moment donné dans une population.

	Pays	Type de bétail	Prévalence
Amérique du Nord	USA	Chèvres	29% (n=19)
	USA, Californie	Bovins âgés de 1 à 11 mois	3,9% (n=915)
	USA, Maryland	Bovins âgés de plus de 6 mois Bovins âgés de plus de 1 an	20,7% (n=184 sur 3 fermes) 4,7% (n=43 sur 3 fermes)
	Canada	Moutons Bovins âgés de plus de 6 mois	24% (n=89) 9% (n=54)
Europe	Espagne	Chèvres Agneaux Moutons	11% (n=367) 59% (n=583) 15% (n=2204)
	Espagne	Veaux âgés de 2 à 36 jours Veaux sevrés âgés de 1,5 à 4,5 mois Génisses de 20 à 24 mois	81% (n=26) 15% (n=34) 0% (n=41)
	Espagne	Bovins adultes	17,8% (n=225) 1,4% (n=141) 70,2% (n=131)
	Ecosse	Bovins adultes	62,4% (n=553) 19% (n=109)
	Italie	Moutons Chèvres	12% (n=156) 19% (n=42)
Pays divers	Iran	Moutons	4% (n=433)
	Sri Lanka	Chevreaux de moins de 6 mois	Environ 33% (n=558)
		Chevreaux entre 7 et 12 mois	Environ 31% (n=133)
		Chèvres âgées de plus d'un an	Environ 20% (n=329)
Taiwan	Cochons	Environ 23% (n=17)	

Tableau II.2 : Prévalence de *Cryptosporidium* sp. chez des Mammifères d'Élevage dans le Monde (Follet, 2005).

La variable « n » représente le nombre d'individus testés pour chaque prévalence.

Chez les bovins, les cryptosporidies sont impliquées comme agents pathogènes majeurs dans les diarrhées du veau nouveau-né (Panciera, Thomassen, & Garner, 1971). Dans la plupart des cas, chez les bovins adultes, l'infection reste asymptomatique. Ces animaux peuvent représenter des sources parasites pour les autres espèces de mammifères réceptives. Des cas de contamination humaine à partir de l'espèce bovine ont d'ailleurs été rapportés (Konkle, Nelson, & Lunn, 1997; Preiser, Preiser, & Madeo, 2003).

Bien que *C. parvum* soit retrouvé en combinaison avec d'autres pathogènes du veau, de nombreuses données montrent qu'il peut agir comme un pathogène primaire chez les bovins (Naciri, Lefay, Mancassola, Poirier, & Chermette, 1999). De plus, en France, selon les études et les régions, la prévalence varie de 18% à 60%. L'expression clinique sous forme de diarrhée est rapportée entre 5% et 90% des cas (Follet, 2005).

### ***II.3.2. L'Homme et la Dispersion de Cryptosporidium***

*Cryptosporidium* sp. est considéré comme le 4<sup>ème</sup> agent responsable de diarrhées infectieuses chez l'homme. La majorité des données provient d'épidémie ou de cas individuels rapportés dans les publications médicales ou scientifiques. Il est difficile d'établir des données épidémiologiques à partir de ces études, celles-ci étant effectuées à partir de critères différents. Si certaines études montrent qu'environ 80% de la population des U.S.A. ou de la population italienne aurait déjà été exposée au parasite (Frost, Muller, Craun, Lockwood, & Calderon, 2002; Weir, Pokorny, Carreno, Trevors, & Lee, 2001), d'autres études menées aux U.S.A. et en Europe affichent des taux plus faibles compris entre 25 et 35% (Datry, 1995; Rose & Slifko, 1999).

Les estimations montrent une prévalence d'infection plus importante dans les pays en voie de développement que dans les pays industrialisés. Dans ces pays, les populations présentant les plus grands risques sont les enfants en bas âge, les personnes malnutries et une partie des individus immunodéprimés tels que les sidéens.

La prévalence de la cryptosporidiose chez l'adulte immunocompétent est difficile à évaluer. Dans les pays en voie de développement, la prévalence de cette parasitose est comprise entre 1 et 10 % suivant les pays étudiés.

Chez l'enfant, la prévalence est plus importante que chez l'adulte, surtout chez les moins de deux ans. En France, peu de données épidémiologiques sont disponibles. Une étude réalisée en 1987 chez 260 enfants de crèche présentant une diarrhée a montré une prévalence de cryptosporidiose de 4.2% (Brasseur, Lemeteil, & Mallet, 1987). En 1990, lors d'une épidémie de gastro-entérite survenue dans une crèche hospitalière, la prévalence atteint 21% alors qu'elle était de 5% en dehors de l'épisode épidémique (Bretagne, Jacovella, Breuil, Guillot, Liance, & Houin, 1990). Après avoir été classée comme une infection opportuniste<sup>15</sup> passagère, la cryptosporidiose est, à présent, considérée comme une source majeure de diarrhée infantile avec 20% de l'ensemble des cas des pays développés (Mosier & Oberst, 2000).

Chez l'hôte immunodéprimé, les études de prévalence et d'incidence de la cryptosporidiose au cours de l'infection par le VIH sont un peu plus nombreuses que chez les sujets non immunodéprimés mais sont assez hétérogènes (population définie différente, stade de la maladie...). Il est donc difficile d'avoir des bases de comparaison. En France, les quelques études réalisées avant 1996 (date d'introduction des multithérapies anti-rétrovirales) rapportent des prévalences très variables (9 à 34%) sur des effectifs modestes (80 à 200 patients). Après 1996, la seule étude disponible chez 618 patients infectés par le VIH, sans distinction de stade, montre une prévalence de 3,1%. Dans les autres pays, la prévalence serait de 11% en Grande-Bretagne, 16% aux U.S.A., 15% au Burundi, entre 22 et 31% au Zaïre et 41% en Haïti (AFSSA 1: Derouin, Eliaszewicz, Pouillot, & Roze, 2002).

Les estimations de fréquence des cas présentés dans le Tableau II.3 permettent d'évaluer l'impact de la cryptosporidiose dans les pays industrialisés. Peu de données sont actuellement disponibles pour les pays en développement. Les valeurs données tiennent aussi bien compte des cas sporadiques que des épidémies.

Le nombre de cas de cryptosporidiose indiqué par les différentes études est relativement homogène : il est compris entre 2,3 et 24 cas pour 100 000 habitants. Aux U.S.A. et aux Pays-Bas, les taux correspondent à environ 1% de l'ensemble des cas de diarrhées.

Pays	Nombre pour 100 000 habitants
<b>Nouvelle Zélande</b>	24
<b>USA</b>	0,3 à 2,5 (soit 0,4 à 1% des cas de diarrhée)
	2,8
	2,3
<b>Angleterre</b>	9,3
<b>Ecosse</b>	17,2
<b>Irlande du nord</b>	10,7
<b>Belgique</b>	7.4
<b>Pays-Bas</b>	32 000 cas par an (soit environ 1,6% des cas de diarrhée)

Tableau II.3 : Exemple de Taux de Cryptosporidiose dans les Pays Industrialisés (Follet, 2005)

## II.4. Transmission

### II.4.1. *La Voie Hydrique*

Le large spectre d'hôtes et la grande quantité d'oocystes potentiellement excrétés par chaque individu infecté assure la contamination des eaux environnementales et, a fortiori, celle des ressources hydriques utilisées pour la production d'eau potable. Par ailleurs, la forte résistance des oocystes aux composés chimiques classiquement utilisés dans les traitements de potabilisation (comme le chlore) ainsi que leur petite taille qui leur permet de franchir les barrières physiques (comme la filtration sur sable), favorisent la persistance des oocystes dans les eaux potables. La contamination des eaux potables par les eaux usées dans les réseaux de distribution constitue une autre possibilité de contamination.

De plus, les eaux récréatives et notamment celles des piscines constituent un environnement favorable aux contaminations par *Cryptosporidium*. En effet, du fait de la résistance des oocystes au chlore et des risques accrus de contamination fécale dans ce contexte, l'absorption accidentelle d'eau peut entraîner une contamination par le parasite. De même, nous nous rendons compte, à la vue de ces considérations, de la facilité de contamination d'un abreuvoir commun chez les animaux d'élevage.

### ***II.4.2. La Voie Alimentaire***

Des épidémies de cryptosporidiose dues à la consommation d'aliments ont été décrites, mais il semblerait que depuis 1993, pas plus de 250 cas, répartis sur 4 épidémies, aient été comptabilisés. *Cryptosporidium* figure en 3<sup>ème</sup> place des parasites responsables d'infections alimentaires aux U.S.A. pour la période 1997-1998.

Les risques de contamination par des aliments congelés sont faibles, par contre, la réfrigération n'est pas une barrière à la contamination.

A la vue des données bibliographiques, il semble que les aliments les plus concernés par la contamination des oocystes soient les coquillages, les légumes et les boissons élaborées étant donné que ces aliments peuvent avoir un contact avec de l'eau contaminée (survie potentiellement longue des oocystes dans l'eau de mer, irrigation avec des eaux usées non traitées ou apport de fertilisants à base de fèces d'animaux, eau potable potentiellement contaminée utilisée pour l'élaboration de boissons, etc).

### ***II.4.3. Transmission Inter-Individus***

Les études menées montrent que la transmission de personne à personne de *Cryptosporidium* est fréquente au sein de 5,4 à 19 % des familles, dans les centres de soins et les centres hospitaliers ainsi que dans les environnements urbains où la population est très dense. Des cas d'apparition en séries ainsi que des portages asymptomatiques ont pu être observés dans des collectivités et plus particulièrement dans des crèches. La contamination nosocomiale est théoriquement possible en raison de l'infectivité des oocystes dès leur émission, mais sa fréquence est très mal évaluée.

Plusieurs études rapportent un facteur saisonnier dans la survenue des cryptosporidioses, chez l'enfant et chez l'adulte. Chez les animaux, sur treize espèces infectant les vertébrés, deux seulement sont responsables des problèmes de santé publique : *Cryptosporidium parvum* et *Cryptosporidium hominis*. La transmission des animaux à l'homme est rencontrée dans les exploitations exposées essentiellement à *C. parvum*.

De plus, des espèces d'insectes non spécifiques du parasite, telle la blatte américaine, la mouche domestique ou des coléoptères coprophages<sup>17</sup> ont déjà été supposées comme intervenant dans la transmission mécanique de *Cryptosporidium* sp. Leur présence cosmopolite fait d'eux des agents de dissémination parasitaire non négligeables. Les insectes coprophages et nécrophages<sup>18</sup> attirent ici plus particulièrement notre attention. En effet, le régime alimentaire de ces invertébrés les met directement au contact des sources environnementales de *Cryptosporidium* telles que les fèces ou les cadavres d'animaux malades.

L'implication potentielle des insectes dans le transport mécanique des parasites n'a été que récemment envisagée. De manière expérimentale, il a été observé que des mouches mises au contact de fèces de bovins infectés par *C. parvum* pouvaient transporter les parasites dans leur tube digestif ou simplement sur leur cuticule<sup>19</sup>. Elles dissémineraient ensuite les oocystes par leurs déjections notamment (Graczyk, et al., 1999 b). D'autre part, il a été montré que plus de 90% des mouches, piégées dans une étable abritant un veau fortement parasité par *C. parvum*, transportaient des oocystes à la surface de leur cuticule et à l'intérieur de leur tube digestif (Graczyk, et al., 1999 b).

Ces insectes se révèlent donc être des vecteurs mécaniques potentiellement non négligeables de *Cryptosporidium* (Follet, 2005). Dans des conditions d'hygiène très rudimentaires, d'autres espèces d'insectes pourraient aussi jouer un rôle important dans la transmission de la cryptosporidiose chez l'homme et les autres mammifères, domestiques ou sauvages. Récemment, des espèces communes de coléoptères coprophages ont été étudiées en laboratoire pour leur capacité à transporter des oocystes de *C. parvum* (Mathison & Ditrich, 1999).

---

<sup>17</sup> Les animaux **coprophages** sont des animaux qui se nourrissent des excréments des autres animaux.

<sup>18</sup> Les animaux **nécrophages** sont des animaux qui se nourrissent d'animaux mort. La nécrophagie ne concerne que la consommation d'êtres d'une autre espèce.

<sup>19</sup> La **cuticule** désigne la couche externe sécrétée par l'épiderme notamment chez les insectes. Elle constitue leur exosquelette (ou squelette externe).

Les résultats ont montré que, au contact de fèces de bovins infectés par *C. parvum*, ces insectes coprophages pouvaient transporter des oocystes à la surface de leur exosquelette et dans leur tube digestif. Les insectes pourraient ainsi disséminer directement le parasite par simple portage, par leurs déjections ou encore intégrer la chaîne alimentaire et ainsi, disperser *Cryptosporidium*.

L'histoire de l'homme est jalonnée de maladies pour lesquelles il fût parfois long et difficile de démontrer l'implication des insectes en tant que vecteur du pathogène. Dans de nombreux cas, des mouches ont été incriminées dans le transport de protistes, bactéries, virus voire de vers. Les insectes véhiculeraient ces agents pathogènes depuis des excréments contaminés jusqu'aux produits alimentaires humains. Dans cette mécanique, les pattes, les pièces buccales voire l'appareil digestif représenteraient les supports de ces transports (Follet, 2005).

Dans le cadre de *Cryptosporidium parvum*, les oocystes infectants sont retrouvés dans les déjections d'animaux, notamment au niveau du fumier produit dans les unités de production animale. Ces accumulations de déjections représenteraient ainsi des sources d'oocystes importantes où se développent les larves de nombreux insectes coprophages. En ce sens, les travaux de Graczyk *et al.* (Graczyk, Cranfield, Fayer, & Bixler, 1999 a) ont montré expérimentalement une implication de la mouche domestique dans un transport mécanique d'oocystes. De plus, Mathison *et al.* (Mathison & Ditrich, 1999) ont mis en évidence un portage d'oocystes sur la cuticule de bousiers ainsi que dans leurs excréments.

Ces données viennent donc confirmer l'importance des insectes dans la circulation parasitaire. L'ensemble de ces données n'a toutefois pas permis de préciser le rôle exact et la part que prennent les insectes dans la circulation de *C. parvum* au sein des écosystèmes.

## II.5. Vers une Modélisation du Problème

Tout ce qui vient d'être exposé dans cette partie, nous montre que le genre *Cryptosporidium* peut être responsable de nombreux cas de maladies notamment intestinales chez de nombreuses espèces animales mais aussi chez l'homme. Il peut provoquer des épidémies importantes, comme celle de Milwaukee en 1993, avec des conséquences parfois importantes. C'est pour ces raisons, qu'en France, de grands organismes comme l'AFSSA (Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments) et l'Institut Pasteur s'intéressent de près au parasite, sachant d'autant plus que les réglementations en la matière restent floues dans notre pays.

La cryptosporidiose représente un danger non négligeable pour des questions de santé publique mais pose également de nombreuses difficultés en particulier dans le domaine de l'élevage bovin. Le risque est important et, indépendamment des enjeux sanitaires et humains évidents, cette parasitose est également susceptible d'engendrer des pertes économiques substantielles. Les déficits occasionnés sont d'autant plus perceptibles lorsqu'il est question d'élevages : traitements, nettoyages, animaux mort ou malades, etc représentent un coût considérable en temps et en argent pour les exploitants agricoles. C'est en grande partie pour cette raison que nous avons porté notre étude sur la race bovine.

L'amplitude du problème réside dans le fait qu'il n'y a pas aujourd'hui de méthode reconnue efficace pour combattre le parasite ou pour soigner la maladie dont il est responsable. Nous avons montré, au travers de la description du parasite (§II.1), que la nature de *Cryptosporidium* lui permettait de résister aux méthodes traditionnelles d'élimination des pathogènes aussi bien dans l'environnement des hôtes potentiels que dans leur organisme. En outre, par son mode de reproduction, *Cryptosporidium* assure la pérennité de l'infection chez l'hôte initialement infecté et sa diffusion dans l'environnement par les déjections de cet hôte.

La façon dont *Cryptosporidium* circule dans l'environnement est actuellement encore obscure. Nous avons néanmoins exposé le fait que la contamination a lieu par voie féco-orale par l'intermédiaire de différents vecteurs. Nous avons vu, à ce propos, que l'eau contaminée est probablement la cause la plus significative de l'inoculation du parasite chez un hôte. D'autres vecteurs comme les aliments ou les insectes sont également à prendre en considération. Selon les cas, il est possible de relativiser leur influence dans la propagation du parasite : les coquillages, les légumes et les boissons élaborées étant les principaux aliments concernés, nous comprendrons facilement qu'un bovin aura plus de chance de rencontrer des insectes, même par voie alimentaire, que de consommer ce type de produit dans une étable. Toutes ces informations, données par les thématiciens, nous sont essentielles pour construire notre modèle et conditionnent en particulier la nature des acteurs de notre système ainsi que les caractéristiques et les comportements à retenir pour l'examen de la propagation du parasite.

Les études biologiques qui s'intéressent à cette question nécessitent le développement et l'utilisation de méthodes de détection du parasite qui soient fiables et sensibles. Ces méthodes obligent bien souvent la mise en place de protocoles longs et coûteux. Afin d'obtenir des résultats fiables, les expériences à réaliser sont alors nombreuses et fastidieuses. La mise en œuvre de protocoles expérimentaux réels dans le but d'étudier les causes de la propagation du parasite est donc difficile. De plus, le nombre de paramètres expérimentaux entrant alors en jeu est souvent important et délicat à maîtriser ; cela rend compliqué l'évaluation, d'une part, de l'impacte qu'a réellement chacun de ces paramètres dans l'établissement potentiel d'une pandémie, et, d'autre part, des répercussions que le changement de l'un d'eux peut avoir sur le système étudié. L'intérêt de passer par un outil de simulation est d'autoriser les biologistes à tester l'évolution d'un système, dans un temps relativement court, en posant des conditions expérimentales précises au travers de scénarii. Chaque paramètre peut alors être modifié indépendamment des autres afin d'évaluer son influence sur le système.

C'est pour cette raison que les thématiciens du domaine, en l'occurrence les parasitologues, ont cherché à représenter le système de circulation du parasite d'une autre manière que par la voix de l'expérimentation réelle. Ils ont alors fait appel à nous dans le but de formaliser le problème et d'en réaliser la modélisation pour rendre son analyse plus accessible. C'est dans ce contexte que les concepts développés à la fin du chapitre I (§III.3 Limites des SMA et Simulation Orientée Agent (SOA)) prennent toute leur ampleur. En effet, les biologistes jouant le rôle de thématiciens, nous avons rempli ceux de modélisateur et d'informaticien. Nous avons dû comprendre comment se comporte *Cryptosporidium* pour pouvoir réaliser le *modèle opérationnel* du système à étudier.

Durant la mise en place de ce travail, nous nous sommes heurtés dans un premier temps à des disparités sémantiques, puis, dans un second temps, à des points de vue méthodologiques différents. En effet, chaque domaine scientifique a un vocabulaire précis qu'il convient d'employer pour se comprendre efficacement dans un contexte multidisciplinaire ; mais, d'une manière moins évidente, il s'agit surtout d'adopter une démarche expérimentale et scientifique dans laquelle chaque acteur du projet se retrouve et arrive à ses fins. De fait, deux individus issus de disciplines différentes développent des moyens pour aborder un problème qui sont dissemblables et ont également des techniques, des méthodes mais aussi des conduites scientifiques distinctes.

Comme nous l'avons déjà souligné, nous passons par la simulation pour créer une abstraction du système à étudier ; plus particulièrement, nous utilisons des techniques issues de l'IAD, en particulier les SMA, afin de modéliser les mécanismes présents dans les systèmes complexes. L'introduction des biologistes à ces outils ainsi qu'à la vision systémique ont permis de résoudre en grande partie les problèmes évoqués. De fait, le recul sur le système à étudier qu'a apporté cette vision a permis une formalisation du problème. Cela nous a, par ailleurs, autorisé à procéder à une déclinaison du sujet en étapes et en entités distinctes (constitution des agents, des interactions, des rapports à l'environnement, etc.). L'utilisation des concepts liés à l'IAD et aux SMA nous ont permis de mieux nous comprendre et d'avancer, dans une démarche commune, vers un objectif commun.

D'autre part, nous avons développé, au fur et à mesure, différents moyens nous permettant de mieux communiquer notamment des fiches récapitulatives pour chaque sujet abordé (Annexe 1).

Cette étape d'analyse du système nécessite de nombreuses rétroactions entre le thématicien et le modélisateur et soulève, la plupart du temps, des questions de données manquantes pour la réalisation du *modèle de conception*. Nous n'avons pas échappé à la règle et nous avons travaillé conjointement à combler ces failles dans le *modèle du domaine* en essayant d'accroître nos connaissances. Nous avons mis en œuvre plusieurs moyens pour y remédier en fonction du type d'information qu'il nous manquait :

- Des expériences en laboratoire, pratiquées par les biologistes, avec mise en place de protocoles afin d'obtenir des données chiffrées sur le parasites, sa propagation et son développement.
- Développement et utilisation du réseau de collaborateurs : mise en relation avec des vétérinaires et des exploitants agricoles pour des expériences sur le terrain et également pour recueillir leur expérience du parasite.
- Données quantitatives empruntées à d'autres espèces que celle choisie (en l'occurrence, l'espèce bovine).

La difficulté pour trouver des données atteste également de la complexité de valider de telles modélisations par des expérimentations correspondant parfaitement aux situations simulées. La raison principale réside dans le fait que c'est justement sur le système simulé que nous voulons en apprendre davantage ; nous avons déjà abordé le fait de la difficulté de procéder à des expérimentations réelles et c'est précisément la complexité de leur mise en place qui mène à l'utilisation d'une simulation. Il semble donc évident qu'il n'existe pas d'expérimentation réelle pouvant attester que le système modélisé correspond intégralement à la réalité sinon la simulation perdrait une part de son intérêt.

L'expertise du thématicien est alors essentielle pour attester que le système évolue de manière comparable à un cas réel. Il est également possible de s'appuyer sur différentes sources bibliographiques afin de valider le comportement du système par parties sachant qu'il reste capital de lier ses éléments par une analyse du comportement global du système.

Quoi qu'il en soit, l'avantage de ce modèle de simulation informatisée est de pouvoir étudier l'évolution d'un système sur un grand nombre d'expérimentations relativement rapidement. Cela permet d'observer un nombre de cas important et de faire une analyse statistique significative, alors que sur la base d'une expérimentation réelle, souvent longue, l'analyse des résultats n'est liée qu'à un seul événement. De plus, bien que celui-ci ait eu l'avantage de se produire réellement, il n'est vraisemblablement pas possible de maîtriser entièrement une expérimentation grandeur nature et tous les problèmes connexes, sanitaires et de santé publique, que représente l'inoculation du parasite.

Dans la suite, nous traitons la réalisation du modèle de la circulation du parasite, puis, nous revenons sur les problèmes liés à la validation et la manière dont nous avons procédé pour y parvenir. Nous verrons également les évolutions possibles du modèle qui ont été soulevés par l'observation et l'analyse des résultats obtenus lors des premières simulations. Enfin, nous verrons que la gestion de flux par systèmes multiagents peut être utilisée dans bien des domaines et que les concepts employés sont applicables relativement naturellement à d'autres sujets que ceux traités en épidémiologie.

### *III. Modélisation de la Circulation de Cryptosporidium*

#### **III.1. Mise en Situation : l'Environnement de *Cryptosporidium***

Comme nous avons pu le remarquer, les systèmes multiagents sont particulièrement adaptés à la simulation de phénomènes biologiques car ils permettent de décrire une société à l'aide de lois comportementales locales.

Un premier programme de simulation basé sur le principe des systèmes multiagents a été réalisé. Une telle simulation consiste alors à définir les lois comportementales (de préférence les plus simples possibles) à introduire dans nos agents dans l'objectif d'observer un comportement collectif qui soit en adéquation avec la réalité et qui nous permette d'en apprendre davantage sur le système étudié.

Nous avons déjà soulevé le fait que la prévalence du parasite chez les bovins ainsi que leur mode de vie favorisent la propagation du parasite. Ceci nous a décidés à baser notre modèle sur l'étude de ces animaux. Par conséquent, dans notre cas, il s'agit de définir les lois locales qui régissent le comportement des bovins en présence de *Cryptosporidium* afin de reproduire et de simuler les phénomènes collectifs qui en résultent dans un environnement spécifique (champ, étable, etc.).

La majeure partie des données utilisées est extraite du rapport de l'AFSSA sur les risques associés à *Cryptosporidium* sp. (AFSSA 1: Derouin, Eliazewicz, Pouillot, & Roze, 2002). Ainsi, le modèle informatique édité dans ce travail, est basé sur des données chiffrées en référence à l'Homme, puis élargies aux bovins. Les informations reprises ici sont à l'origine de fiches de travail servant de lien entre thématiciens (biologistes) et modélisateur (Annexe 1).

Les informations recueillies dans ce rapport, nous ont amené à considérer trois types d'agents agissant significativement dans la dissémination du parasite au sein de l'écosystème que nous avons choisi : les vaches, les veaux et les mouches. Deux autres types d'agents ont été définis, l'eau et les bouses, avec des caractéristiques plus restreintes dues à leur nature même.

Les règles qui régissent l'évolution du système supposent l'existence d'un environnement virtuel qui pourrait être assimilé à une étable : un local clos avec des box et des nettoyages fréquents. Par ailleurs, dans cette première SOA, l'environnement n'est encore doté d'aucune métrique ; par conséquent, malgré le fait que toutes les interactions et les contacts entre les bovins et avec leur environnement soient pris en compte de manière spécifique aux différentes entités présentes, le système ne comprend pas de représentation explicite des mouvements des agents. Cependant, cette optique s'inscrit dans la continuité du projet dont nous verrons les aspects au §V de ce chapitre. L'environnement virtuel dans lequel évolue le troupeau prend donc toute son importance par le fait des contacts entre les entités du milieu mais aussi parce que les conditions environnementales (humidité, température et entretiens (actions humaines)) tiennent un rôle essentiel.

Etant donné que *Cryptosporidium* est un parasite intestinal, les vaches et les veaux du troupeau qui ont été infectés rejettent dans leurs excréments des oocystes qui se développent dans des conditions spécifiques d'humidité et de chaleur. En fonction de leur état immunitaire et du nombre d'oocystes de *Cryptosporidium* présents dans leurs organismes, les bovins vont réussir à combattre l'infection et donc à diminuer le nombre d'oocystes dans leur organisme. Au contraire, le parasite peut se multiplier jusqu'à parfois provoquer la mort chez certains individus si le nombre de parasites dans leurs organismes dépasse un seuil létal. D'autre part, si ce seuil est atteint et si l'animal a un état de santé suffisamment bon pour combattre le parasite alors il acquiert une immunité face au développement de la maladie et élimine alors le parasite.

Comme nous l'avons vu, les diptères et en particulier la mouche représenterait un vecteur important du parasite. Elle intervient dans la contamination d'autres bovins mais contribue peu à l'augmentation de la quantité de parasites sur les mammifères déjà infectés. Lorsqu'elle se pose sur les divers endroits et individus potentiellement contaminés de l'étable, elle ne peut véhiculer qu'un petit nombre d'oocystes (par rapport à celui développé par les bovins). De plus, *Cryptosporidium* ne se multiplie pas quand il est porté par la mouche mais uniquement dans les tubes digestifs des bovins. Elle est, avec l'eau bue par les bovins, l'un des facteurs d'infection primaires<sup>20</sup>.

Deux types d'« acteur » sont définis : les « puits » ou « réservoirs » représentent des lieux de simple portage du parasite alors que les « organes de transformation » symbolisent les sites de multiplication actifs du parasite. La Figure II.3 ci-dessous montre les relations et les interactions qui existent entre les différents agents du système. Certains auteurs estiment que la mouche et l'abreuvoir sont des « organes de transformation ». Mais, dans l'ensemble de la communauté biologique, il est couramment admis qu'ils doivent être considérés comme des « réservoirs » (Follet, 2005; Graczyk, et al., 2000)

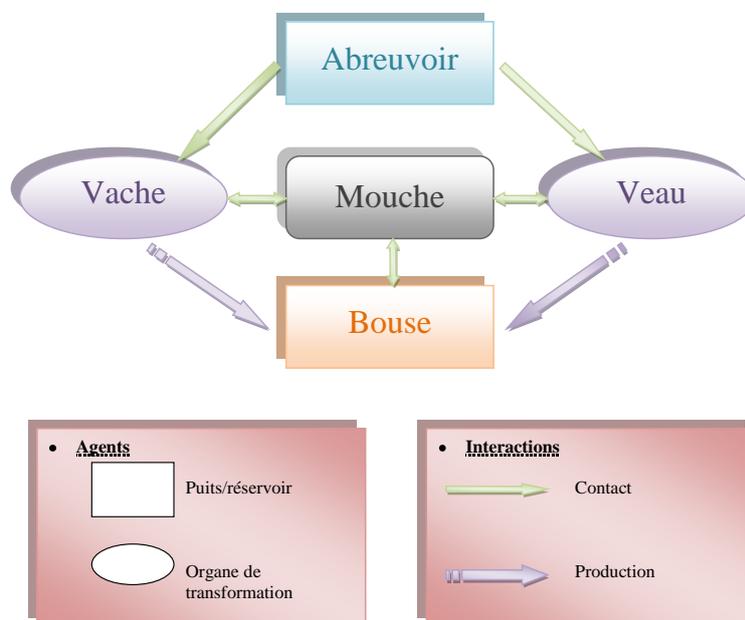


Figure II.3 : Diagramme des Interactions du Système

<sup>20</sup> On appelle **infection primaire** l'ensemble des troubles provoqués par le *premier* contact, la pénétration et le développement d'un micro-organisme infectieux dans l'organisme.

### III.2. Mise en Place des Hypothèses de Travail

Les hypothèses retenues sont fondées sur les données de la littérature et essentiellement sur les données fournies par le document de l'AFSSA « Evaluation quantitative du risque sanitaire lié à la présence de *Cryptosporidium* sp. dans l'eau de distribution » (AFSSA 2: Derouin, Beaudeau, Pouillot, & Roze, 2002) et par la thèse de Follet (Follet, 2005) réalisée au laboratoire Environnement & Santé de la Faculté Libre des Sciences et Technologies de Lille (FLST) avec qui nous avons collaboré pour cette étude. Par manque d'informations chiffrées relatives aux bovins, toutes les données concernant les doses infectantes sont établies à partir d'études sur les hommes, les valeurs étant ensuite transposées aux bovins. Des recherches sont actuellement en cours afin de pouvoir adapter les données et ainsi retranscrire de façon fidèle l'aspect quantitatif d'une épidémie à *Cryptosporidium*.

L'étude prend en compte deux populations : l'une immunocompétente et l'autre immunodéprimée. Deux séries de données sont donc utilisées pour traiter la modélisation. En ce qui concerne la population immunocompétente, les informations sont obtenues à partir des travaux de DuPont *et al.* (DuPont, Chapell, Sterling, Okhuysen, Rose, & Jakubowski, 1995) et Okhuysen *et al.* (Okhuysen, Chappell, Crabb, Sterling, & DuPont, 1999). Concernant la population immunodéprimée, une transposition est faite à partir des travaux réalisés chez la souris par Yang *et al.* (Yang, Benson, Du, & Healey, 2000).

Nous exposons dans la suite les postulats utilisés pour réaliser la modélisation.

Tout d'abord, lors de l'ingurgitation d'eau infectée, il est nécessaire de prendre en compte la proportion d'oocystes viables. En effet, seuls les oocystes considérés comme viables sont susceptibles de se développer au sein des bovins et donc de provoquer une infection. A partir des données de l'AFSSA, nous considérons que la proportion d'oocystes viables dans l'eau est fixée à une valeur de 0,4. Cette proportion est alors assimilée à une probabilité.

Le taux d’oocystes par litre d’eau est variable selon les cas et est fixé par l’utilisateur. Ce rapport détermine la contamination de l’eau. Lorsqu’il est associé à la quantité d’eau absorbée par un individu, il nous permet de définir le nombre d’oocystes consommés. L’évaluation de l’exposition des bovins résulte de la combinaison de la quantité d’oocystes consommée et de la quantité viable.

Autrement dit, si  $O_t$  = nombre d’oocystes consommés et  $O_v$  = nombre d’oocystes viables alors  $O_v$  suit une loi de distribution de type binomiale<sup>21</sup> de paramètres  $O_t$  et 0,4 (proportion d’oocystes viables dans l’eau)

$$O_v \sim \text{Binomiale}(O_t, 0,4)$$

Équation II.1

D’autre part, nous considérons que les oocystes viables sont tous potentiellement infectants (hypothèse forte<sup>22</sup> et sécuritaire<sup>23</sup>). En outre, un oocyste aura plus ou moins de chance d’infecter un hôte en fonction de la dose de parasites ingérée. Nous introduisons donc une probabilité  $r$  qu’un oocyste à de provoquer une infection en fonction de la dose d’oocystes viables ingérée ( $O_v$ ).

Nous définissons ainsi une loi permettant de corréler l’infection à la dose :

$$Pr(\text{Infection} | \text{Dose}) = 1 - e^{-r \times \text{Dose}}$$

Équation II.2

$r$  est différent de 1 car pour qu’un oocyste puisse provoquer une infection, il doit arriver sur le site d’infection et survivre aux défenses locales de l’organisme (par exemple les lymphocytes ou les anticorps).

<sup>21</sup> **Définition d’une loi binomiale:** Soit  $\Omega$  l’univers associé à une expérience aléatoire. Soit  $X$  une variable aléatoire définie sur  $\Omega$ . On dit que  $X$  suit une loi binomiale de paramètres  $n \in \mathbb{N}^+$  et  $p \in [0;1]$  lorsque  $X(\Omega) = \{0; 1; \dots ; n\}$  et que pour tout  $k \in \{0; 1; \dots ; n\}$ ,  $P([X = k]) = C_n^k p^k(1-p)^{n-k}$ .

On note alors  $X \sim \text{Binomiale}(n,p)$ .

**Application de la loi binomiale:** Soit  $E$  une épreuve comportant 2 issues (Succès ou Echec). On note  $p$  la probabilité du Succès. On répète  $n$  fois, de façons indépendantes, l’épreuve  $E$ . Soit  $X$  la variable aléatoire correspondant au nombre de succès. Alors:  $X$  suit une loi binomiale de paramètres  $n$  et  $p$

<sup>22</sup> Une hypothèse est dite **sécuritaire** si son adoption a tendance à surestimer le risque.

<sup>23</sup> Une hypothèse est dite **forte** si elle n’est pas réaliste ; elle est dite **faible** sinon.

Il nous faut également connaître la probabilité  $r$  qu'un oocyste a de provoquer une infection. Cette probabilité diffère en fonction du niveau de santé de l'hôte (en particulier en fonction du niveau d'immunodépression). Afin de représenter cet état de santé chez les bovins, nous avons introduit une variable que nous avons nommée **EIC** pour Etat d'ImmunoCompétence. Elle est comprise entre 0 et 1 : 0 pour faiblement immunocompétent et 1 pour fortement immunocompétent.

Dans le but d'établir une relation entre  $r$  et l'**EIC**, nous allons utiliser les données disponibles concernant la dose infectieuse 50 (**DI50**)<sup>24</sup>. Elle est égale à 165 oocystes pour un individu issu d'une population humaine immunocompétente (DuPont, Chapell, Sterling, Okhuysen, Rose, & Jakubowski, 1995; Okhuysen, Chappell, Crabb, Sterling, & DuPont, 1999). En ce qui concerne une population immunodéprimée, la DI50 est établie à 1.96 oocystes pour un individu issu de cette population (AFSSA 2: Derouin, Beaudeau, Pouillot, & Roze, 2002). De plus, Derouin *et al* nous donnent une relation entre la probabilité qu'un oocyste a de provoquer une infection et la DI50 :

$$DI50 = \frac{-\ln(0,5)}{r} \Rightarrow r = \frac{-\ln(0,5)}{DI50}$$

Équation II.3

$r = 0.00419$  pour une population humaine immunocompétente (i.e. un EIC égal à 1) et  $r = 0.35365$  pour une population humaine immunodéprimée (i.e. un EIC égal à 0). Nous pouvons alors réaliser une extrapolation linéaire en fonction des données précédentes. Ainsi, nous obtenons la relation suivante :

$$r = -0,34946 \times EIC + 0,35365$$

Équation II.4

Ces considérations nous amènent à faire un autre postulat selon lequel il est fait une différence entre population infectée et population développant la maladie. De fait, ce n'est pas parce qu'un individu ingère une dose infectieuse qu'il développe la maladie.

---

<sup>24</sup> La **DI50** représente la quantité de parasites nécessaire et suffisante, chez un individu moyen, pour provoquer l'infection de la moitié d'une population contaminée.

Pour un individu porteur, la probabilité de développer une cryptosporidiose est (AFSSA 2: Derouin, Beaudeau, Pouillot, & Roze, 2002) :

- Pour une population humaine immunocompétente :

$$Pr(\textit{Maladie} \mid \textit{Infection}) = 39\%$$

- Pour population humaine immunodéprimée :

$$Pr(\textit{Maladie} \mid \textit{Infection}) = 100\%$$

Pour notre modélisation, la variable EIC retenue est comprise entre 0 et 1. Par extrapolation linéaire, la probabilité de développer la maladie pour un individu infecté dans notre modèle est établie par la relation suivante :

$$Pr(\textit{Maladie} \mid \textit{Infection}) = -0,61 \times EIC + 1$$

Équation II.5

### **III.3. Définition des Agents**

Nous rappelons que, dans l'environnement choisi, cinq types d'agents sont présents et interagissent (Figure II.3) : les vaches, les veaux, les mouches, l'abreuvoir et les bouses. Contrairement aux autres agents, les bovins sont des organes de transformation et ont, de par cette caractéristique, le rôle de « multiplicateur » du parasite au sein de l'environnement. Ils vont également rejeter le parasite dans cet environnement favorisant ainsi sa dissémination. Ces agents sont, par conséquent, au centre du système, d'autant plus que ce sont leur devenir et leur comportement face à la dissémination du parasite et à la cryptosporidiose en particulier.

La Figure II.4 reprend le fonctionnement du système à partir d'un « individu i » représentant un bovin. Les différentes étapes, pouvant influencer le développement de *Cryptosporidium* dans l'organisme des bovins, y sont ensuite développées. Chacune de ces étapes peut se produire à chaque instant de la simulation et, en fonction de l'occurrence de chacune d'elles, les effets sur le développement du parasite et sur la santé des bovins sont répercutés.

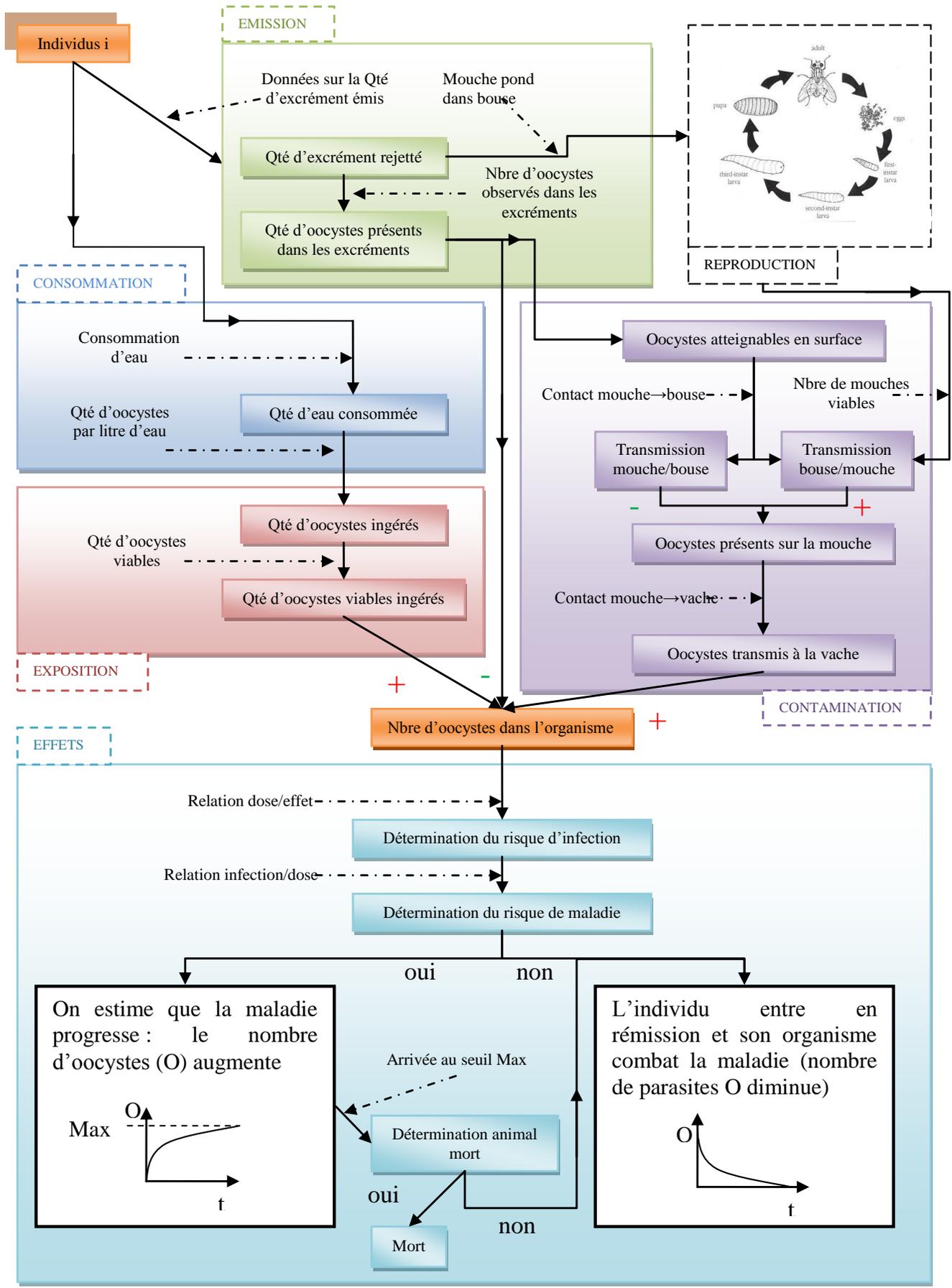


Figure II.4 : Comportement du Système à partir de l'Evolution des Bovins lors d'une Simulation

Nous identifions, dans la Figure III.4, les mécanismes régissant la consommation d'eau contaminée, l'émission dans l'environnement par les selles, la contamination par les mouches et les effets sur l'organisme des bovins. Nous détaillons chacune de ces étapes ci-dessous dans la description des agents du système. En ce qui concerne la reproduction des mouches elle sera développée dans une autre partie (§V.1.1).

Dans les paragraphes qui suivent, nous présentons les processus régissant l'évolution des agents et du système. Nous détaillons, en particulier, les caractéristiques et le fonctionnement de chaque type d'agent composant le modèle. Pour chaque agent évoqué, il est possible de se référer à la Figure II.4 pour situer à quel niveau de l'évolution du système nous nous trouvons. Pour rappel, deux types d'agents sont définis : les agents « puit », chez qui le nombre d'oocystes infectieux portés est stable (il n'y a pas de multiplication du parasite : cas de la mouche, de la bouse et de l'eau) et les agents définis comme « organe de transformation », chez qui le parasite se multiplie (cas du veau et de la vache). Nous cherchons alors à connaître l'évolution du parasite au sein de ces agents.

### ***III.3.1. Les agents « Puits »***

Pour ce type d'agent, les oocystes viables ( $O_v$ ) sont considérés comme tous potentiellement infectants (hypothèse faible<sup>23</sup> et sécuritaire<sup>22</sup>).

#### ***III.3.1.a. Agent Mouche***

Les travaux de Graczyk *et al.* (Graczyk, et al., 2000) montrent que les mouches sont des transporteurs passifs d'oocystes. De plus, les études menées sur le devenir des oocystes au cours du développement larvaire des diptères coprophages par Follet (Follet, 2005), corroborent cette idée de simple transport. Ces insectes sont donc considérés comme agents « puits ».

L'agent « mouche » est caractérisé par le nombre maximum d'oocystes de *Cryptosporidium* qu'il est susceptible de porter ( $NbMaxCrypto$ ) et par le nombre d'oocystes viables infectieux portés ( $O_v$ ).

Nous définissons l'état de départ de l'agent « mouche » (Initialisation) puis son évolution après la captation d'oocystes. De plus, nous considérons que lorsqu'une mouche capte des oocystes, elle peut en porter au maximum  $10^3$  (ordre de grandeur évalué à partir des études menées sur la quantification des oocystes retenus par une mouche en fonction du temps de contact avec un substrat contaminé; (Follet, 2005)). Nous supposons également qu'au minimum 10% et 80% en moyenne de ces oocystes sont infectieux.

Le nombre maximum d'oocystes pouvant être porté est différents pour chaque agent « mouche ». Nous le définissons de la manière suivante :

$$NbMaxCrypto = \text{Max} \left( \frac{10^3}{1000}, \text{Binomiale}(10^3, 0, 8) \right)$$

Équation II.6

$\frac{10^3}{1000}$  représente la quantité minimale d'oocystes pouvant être portée par une mouche (ici 1 oocyste)

***Binomiale***( $n, p$ ) est la loi binomiale de paramètre  $n$ , quantité maximale qu'une mouche peut porter c'est-à-dire  $10^3$ , et de paramètre  $p$ , nombre d'oocystes infectieux en moyenne c'est-à-dire 80%.

Au départ de la simulation, un nombre d'oocystes peut être attribué à chaque agent « mouche » ( $qc$ ). Il est défini par l'expérimentateur lorsqu'il décide d'introduire une mouche dans le modèle et représente une quantité de parasites captée initialement par l'agent. Le nombre d'oocystes viables infectieux portés ( $O_v$ ) est alors calculé comme suit :

$$O_v = \text{Max} \left( \frac{qc}{10}, \text{Binomiale}(qc, 0, 8) \right)$$

Équation II.7

$\frac{qc}{10}$  représente la quantité minimale d'oocystes infectieux qu'une mouche peut porter après contact avec un substrat parasité (c'est-à-dire 10% de la quantité d'oocystes portés).

***Binomiale***( $n, p$ ) est une loi binomiale de paramètre  $n$ , quantité d'oocystes portés ( $qc$ ), et de paramètre  $p$ , nombre d'oocystes infectieux en moyenne (80%).

### III.3.1.b. Agent Bouse

Cet agent est défini par le nombre d'oocystes accessibles ( $O_{v,accessible}$ ) et par le nombre d'oocystes viables infectieux portés ( $O_v$ ).

Lorsqu'une bouse est produite, une quantité d'oocystes initiale ( $qc$ ) lui est attribuée en fonction de son poids (§III.4.4). Nous supposons que lorsqu'une bouse est produite, au minimum 20% et en moyenne 90% des oocystes sont infectieux. Nous supposons également que les oocystes contenus dans une bouse ne sont pas tous accessibles, seuls ceux en surface le sont. Nous considérons qu'au moins 1% et en moyenne 10% sont accessibles (valeurs définies en fonction de la surface et du volume d'une bouse).

Nous déterminons le nombre d'oocystes viables infectieux accessibles de la façon suivante :

$$O_v = \text{Max} \left( \frac{qc}{5}, \text{Binomiale}(qc, 0, 9) \right)$$

Équation II.8

$$O_{v,accessible} = \text{Max} \left( \frac{O_v}{100}, \text{Binomiale}(O_v, 0, 1) \right)$$

Équation II.9

### III.3.1.c. Agent Eau (Abreuvoir)

Cet agent est défini par le nombre d'oocystes viables par litre ( $O_v$ ).

Nous considérons qu'en moyenne 40% des oocystes trouvés dans l'eau sont viables avec un minimum de 5% (AFSSA 2: Derouin, Beaudeau, Pouillot, & Roze, 2002).

Le nombre d'oocystes viables infectieux est alors ici défini par :

$$O_v = \text{Max} \left( \frac{qc}{20}, \text{Binomiale}(qc, 0, 4) \right)$$

Équation II.10

Où  $qc$  représente la quantité d'oocystes par litre d'eau présente dans le système de distribution et définie par l'expérimentateur au début de la simulation.

### III.3.2. Les Agents « Organe de Transformation »

#### III.3.2.a. Agent Vache

##### *i. Détermination du nombre d'oocystes viables infectieux initial*

Cet agent est défini, tout d'abord, par son Etat d'ImmunoCompétence (**EIC**) qui représente l'état de santé du bovin. L'EIC varie entre 0 et 1.

Le nombre maximum d'oocystes pouvant se trouver dans l'organisme de la vache (**NbMaxCrypto**) et le nombre d'oocystes viables infectieux portés ( $O_{v,i}$ ) sont également des variables caractérisant l'état du bovin.

Dans un premier temps, le seuil **NbMaxCrypto** est fixé aléatoirement en fonction de l'EIC. Nous considérons que la vache peut porter un maximum de  $10^8$  oocystes (AFSSA 2: Derouin, Beaudou, Pouillot, & Roze, 2002).

$$\text{NbMaxCrypto} = \text{Max} \left( \frac{10^8}{1000}, \text{Binomiale}(10^8, 1 - \text{EIC}) \right)$$

Équation II.11

$\frac{10^8}{1000}$  représente la quantité minimale d'oocystes présents dans l'organisme pouvant constituer le seuil.

**Binomiale**( $n, p$ ) est une loi binomiale de paramètre  $n$ , quantité maximale d'oocystes pouvant être portés par une vache (ici  $10^8$ ), et de paramètre  $p$ , nombre d'oocystes infectieux en fonction de l'EIC (1-EIC).

Une seconde étape consiste à attribuer à l'organisme du bovin un nombre initial de parasites viables ( $O_v$ ) évaluée en fonction du nombre d'oocystes défini par l'expérimentateur au temps  $t_0$  ( $qc$ ).

$$O_v = \text{Max}\left(\frac{qc}{100}, \text{Binomiale}(qc, 0, 4)\right)$$

#### Équation II.12

Puis, nous déterminons le nombre d'oocystes viables infectieux ( $O_{v,i}$ ) par la soustraction de la quantité d'oocystes viables non infectieux à la quantité totale d'oocystes viables  $O_v$ . La part d'oocystes non infectieux est calculée par le rapport  $-\frac{\ln(p)}{r}$  avec  $p$ , valeur aléatoire comprise entre 0 et 1, et  $r$ , la probabilité qu'un oocyste provoque une infection qui est fonction de l'EIC (AFSSA 2: Derouin, Beaudou, Pouillot, & Roze, 2002).

Soit  $p \in [0,1]$  valeur aléatoire, alors :

$$O_{v,i} = O_v - \left(-\frac{\ln(p)}{r}\right)$$

$r$  étant défini par l'Équation II.4.

Puis il est nécessaire de déterminer si la maladie se déclenche ou non et si la dose ingérée est mortelle ou non.

#### *ii. Détermination du déclenchement de la maladie*

Nous cherchons à savoir si l'individu parasité déclenche ou non une cryptosporidiose après ingestion d'oocystes.

Soit  $p$ , une valeur aléatoire, si  $p$  est inférieur à la probabilité de développer la maladie pour un EIC donné (Équation II.5) et que l'individu n'a jamais été malade, alors la maladie se déclenche.

### *iii. Détermination si la dose ingérée est létale*

La dose ingérée est définie comme mortelle aléatoirement en fonction de l'EIC de la vache (plus l'EIC est faible, plus la probabilité que la dose soit mortelle est grande).

Soit  $p$ , une valeur aléatoire, si  $p$  est inférieur ou égal à l'EIC majoré  $((0,2-EIC)*5 \geq p)$  alors la dose ingérée est considérée comme mortelle.

### *iv. Evolution du nombre d'oocystes présent dans l'organisme des bovins*

Une fois la dose ingérée, la quantité d'oocystes évolue différemment selon l'EIC de l'hôte. Une vache malade peut guérir si nous supposons que la dose ingérée n'est pas létale même si elle atteint le nombre maximum d'oocystes portés. Par contre, une vache meurt si la dose ingérée est létale et qu'elle atteint le nombre maximum d'oocystes pouvant être portés. Nous considérons qu'une vache ne peut plus être malade si elle l'a déjà été.

Pour calculer l'évolution de la quantité d'oocystes viables infectieux dans l'organisme des bovins, nous faisons appel à une loi d'évolution classique de population énoncée par Thomas Malthus (Essai sur le principe de population, 1798). Le principe est de considérer que la vitesse de croissance est, à tout moment, proportionnelle à son effectif présent. Nous introduisons la constante  $k$  qui exprime le pourcentage d'augmentation de l'effectif, pendant la période considérée (si l'augmentation à été de 25%, alors  $k=1,25$ ). Un tel processus peut être formalisé (équation logistique) en comparant l'effectif  $n_0$  à ce qu'il deviendra ( $n_1$ ) au bout d'un temps donné  $\Delta t$  (défini comme unitaire) :

$$n_1 = k n_0$$

Nous pourrions connaître l'effectif  $n_2$  de la population à l'échéance de la période suivante, de même durée  $\Delta t$ , en repartant de la nouvelle valeur  $n_1$  :

$$n_2 = k n_1$$

Et ainsi, nous en déduisons l'effectif  $n$  au temps  $t$  ( $n_t$ ) en fonction de celui au temps  $t-1$  ( $n_{t-1}$ ) :

$$n_t = k n_{t-1}$$

L'accroissement de la population pendant le temps  $\Delta t$  est donc :

$$\Delta n_0 = n_1 - n_0 = k n_0 - n_0 = (k - 1)n_0$$

$$\Delta n_1 = n_2 - n_1 = k n_1 - n_1 = (k - 1)n_1$$

Ces accroissements de population sont observés pendant une période de temps unitaire  $\Delta t$ . Si celle-ci avait une durée deux fois plus élevée, les valeurs obtenues pour  $\Delta n_0$ ,  $\Delta n_1$ , etc. seraient elles mêmes deux fois plus élevées. De sorte que nous pouvons écrire :

$$\frac{\Delta n_0}{\Delta t} = (k - 1)n_0$$

$$\frac{\Delta n_1}{\Delta t} = (k - 1)n_1$$

Soit, en considérant n'importe quelle population initiale  $n_t$  :

$$\frac{\Delta n_t}{\Delta t} = (k - 1)n_t$$

En passant des différences finies aux différentielles :

$$\frac{dn_t}{dt} = (k - 1)n_t$$

D'où :

$$\frac{dn_t}{n_t} = (k - 1)dt$$

Qui conduit, après intégration, à :

$$n_t = n_0 e^{(k-1)t}$$

Nous obtenons donc une croissance exponentielle aussi connue sous le nom de croissance malthusienne.

Dans notre cas, nous voulons calculer l'évolution de la population d'oocystes viables infectieux à un instant  $t$ ,  $O_{v,i_t}$ . De la même manière, nous avons :

$$O_{v,i_t} = k O_{v,i_{t-1}}$$

#### Équation II.13

Il faut alors définir  $k$  afin d'obtenir une augmentation en accord avec la croissance du parasite dans l'organisme. Nous avons vu dans le schéma du comportement du système à partir de l'évolution des bovins lors d'une simulation (Figure II.4) que nous considérons deux cas d'évolution du nombre de parasites. Si le bovin est « malade » alors le parasite se développe, par contre, si le bovin entre en « rémission », son organisme élimine les oocystes et le nombre de parasites diminue. Nous avons donc :

- Si le bovin est malade, alors  $k \geq 1$  et nous définissons  $k = 1 + k'$
- Si le bovin est en rémission, alors  $k \leq 1$  et nous définissons  $k = 1 - k'$

$k'$  est d'abord défini en fonction du  $\Delta t$  :

- Le bovin est malade : plus le laps de temps est long (i.e.  $\Delta t$  est grand), plus la population est grande (i.e.  $k$  est supérieur à 1).
- Le bovin est en rémission : plus le laps de temps est long (i.e.  $\Delta t$  est grand), plus la population diminue (i.e.  $k$  tend vers 0).

↳ D'où plus  $\Delta t$  est grand plus  $k'$  est grand également indépendamment du cas considéré, malade ou en rémission.

De plus, la croissance du parasite est fonction de l'état immunitaire de l'individu concerné.  $k$  doit donc également dépendre de l'EIC :

- Le bovin est malade : plus l'état de santé d'un bovin est considéré comme bon (i.e. l'EIC est grand), plus la croissance du parasite est ralentie (i.e.  $k$  tend vers 1  $\rightarrow k'$  est petit).

- Le bovin est en rémission : plus l'état de santé d'un bovin est considéré comme bon (i.e. l'EIC est grand), plus l'élimination du parasite est rapide (i.e.  $k$  tend vers 0  $\rightarrow k'$  est grand).

↳ Deux cas sont donc à prendre en compte. Selon que l'animal soit malade ou en rémission,  $k'$  doit évoluer de façon opposée.

Nous avons défini  $k'$  afin qu'il évolue selon ces critères :

$$k' = \Delta t \times \tau \times e^{\Delta t \times \tau}$$

Ainsi, pour un  $\tau$  constant,  $k'$  augmente si  $\Delta t$  augmente.

Pour un  $\Delta t$  constant, nous définissons  $\tau$  tel que :

- Le bovin est malade :  $\tau = 1 - EIC$  alors plus l'EIC est grand plus  $k'$  est petit.
- Le bovin est en rémission:  $\tau = EIC$  alors plus l'EIC est grand plus  $k'$  est grand.

D'une manière générale, nous avons donc :

↳ Si l'animal est malade, le nombre d'oocystes augmente :

$$O_{v,i_t} = (1 + \Delta t \times (1 - EIC) \times e^{\Delta t \times (1 - EIC)}) O_{v,i_{t-1}}$$

Équation II.14

↳ Sinon, il diminue :

$$O_{v,i_t} = (1 - \Delta t \times EIC \times e^{\Delta t \times EIC}) O_{v,i_{t-1}}$$

Équation II.15

#### v. Détermination de la mort de la vache

Si l'animal est malade, si le nombre d'oocystes portés par l'animal est supérieur au nombre maximum d'oocystes pouvant être portés et si la dose est considérée comme létale, alors l'animal meurt.

#### *vi. Détermination de la guérison de la vache*

Si l'animal est malade, si le nombre d'oocystes portés par l'animal a atteint le nombre maximum d'oocystes pouvant être portés et si la dose n'est pas considérée comme létale, alors l'animal guérit.

#### III.3.2.b. Agent Veau

Les calculs concernant le veau sont régis par les mêmes paramètres et la même méthode que pour l'agent « vache ». Les différences se situent au niveau des valeurs chiffrées qui varient. En particulier, nous considérons que le nombre maximum d'oocystes pouvant être portés pour le veau est de  $10^7$  contre  $10^8$  pour la vache. De plus, afin de représenter la prévalence plus forte chez les veaux, nous considérons qu'un veau, contrairement à la vache, n'acquière pas d'immunité par rapport au parasite. C'est-à-dire qu'un veau qui est tombé malade et qui guérit peut le redevenir et mourir alors que pour la vache cela est impossible.

### **III.4. Définition des Interactions**

Les interactions entre les individus influençant la dissémination du parasite sont assimilées à des contacts au cours desquels un certain nombre de parasites peut être échangé entre les individus concernés. Nous définissons, pour ce faire lors de chaque contact, deux rôles distincts aux agents participants. Ainsi l'agent *Source* représente l'individu qui fournit les oocystes et l'agent *Destination* représente l'entité destinataire, apte à recevoir les oocystes. Les contacts possibles sont :

- **Eau → Vache** : La vache boit et donc absorbe ou non des oocystes
- **Eau → Veau** : Le veau boit et donc absorbe ou non des oocystes
- **Mouche → Vache** : La mouche se pose sur la vache
- **Mouche → Veau** : La mouche se pose sur le veau
- **Mouche → Bouse** : La mouche se pose sur la bouse et la contamine
- **Bouse → Mouche** : La mouche se pose sur la bouse et se contamine
- **Vache → Bouse** : La vache défèque
- **Veau → Bouse** : Le veau défèque

A chaque contact, des oocystes peuvent potentiellement être échangés entre les agents. Les contacts entre les bovins peuvent être envisagés dans un autre type d'exploitation appelé allaitant, opposé au type laitier que nous avons choisi. Ce point sera traité par la suite (§V) ainsi que d'autres possibilités d'évolution du modèle.

### III.4.1. L'eau

Pour chaque interaction entre l'abreuvoir et un autre agent, nous avons défini trois paramètres :

- La quantité d'eau absorbée ( $Q_{bue}$ ).
- Le nombre d'oocystes transmissibles par l'eau ( $O_{transmissible}$ ).
- Le nombre d'oocystes réellement transmis par l'eau, c'est-à-dire ingérés par le destinataire ( $O_{transmis}$ ).

La quantité d'eau absorbée ( $Q_{bue}$ ) est le maximum entre une limite inférieure représentant la quantité minimale d'eau pouvant être absorbée à chaque prise ( $Q_{bue_{MIN}}$ ) et une loi *Binomiale*( $n,p$ ) de paramètre  $n$ , quantité d'eau maximum qu'un agent peut boire ( $Q_{bue_{MAX}}$ ), et de paramètre  $p$ , la proportion de cette quantité maximale qu'un agent absorbe en moyenne ( $PQ_{bue_{MOY}}$ ).

$$Q_{bue} = \text{Max}\left(Q_{bue_{MIN}}, \text{Binomiale}(Q_{bue_{MAX}}, PQ_{bue_{MOY}})\right)$$

Équation II.16

Nous définissons  $O_{transmissible}$  qui est la quantité maximal de parasites qu'un agent est susceptible d'absorbé en fonction de  $Q_{bue}$  et de la quantité d'oocystes viables par litre d'eau définie au III.3.1.c,  $O_v$  :

$$O_{transmissible} = Q_{bue} \times O_v$$

Équation II.17

De la même façon que pour  $Q_{bue}$ , nous définissons  $O_{transmis}$  qui représente le maximum entre la quantité minimale d'oocystes transmissibles par l'eau  $O_{transmis_{MIN}}$  et une loi *Binomiale*( $n,p$ ) de paramètre  $n$ , quantité maximale d'oocystes transmissibles par l'eau ( $O_{transmis_{MAX}}$ ), et de paramètre  $p$ , la proportion de cette quantité maximum représentant la quantité moyenne d'oocystes transmissibles par l'eau ( $PO_{transmis_{MOY}}$ ).

$$O_{transmis} = \text{Max} \left( O_{transmis_{MIN}}, \text{Binomiale}(O_{transmis_{MAX}}, PO_{transmis_{MOY}}) \right)$$

Équation II.18

Afin de définir les limites inférieures ainsi que les paramètres de loi binomiale présents dans les formules de  $Q_{bue}$  et de  $O_{transmis}$ , nous nous sommes basés sur le Tableau II.4 :

Agent	Quantité d'eau absorbée par jour	Nombre de prises d'eau	Quantité d'eau minimale absorbée par prise	Quantité d'eau maximale absorbée par prise	Quantité d'eau moyenne absorbée par prise	Quantité d'oocystes minimale ingérée par prise	Quantité d'oocystes moyenne ingérée par prise
Vache	100 litres	10 prises	2 litres	20 litres	10 litres	20%	80%
Veau	50 litres	10 prises	1 litre	10 litres	5 litres	25%	90%

Tableau II.4 : Données sur les Oocystes dans l'Eau (Follet, 2005)

Nous avons donc

- Eau → Vache : La vache boit et donc absorbe ou non des oocystes

$$Q_{bue} = \text{Max}(2, \text{Binomiale}(20, 0, 5))$$

$$O_{transmissible} = Q_{bue} \times O_v$$

$$O_{transmis} = \text{Max} \left( \frac{O_{transmissible}}{5}, \text{Binomiale}(O_{transmissible}, 0, 8) \right)$$

- Eau → Veau : Le veau boit et donc absorbe ou non des oocystes

$$Q_{bue} = \text{Max}(1, \text{Binomiale}(10, 0, 5))$$

$$O_{transmissible} = Q_{bue} \times O_v$$

$$O_{transmis} = \text{Max}\left(\frac{O_{transmissible}}{4}, \text{Binomiale}(O_{transmissible}, 0, 9)\right)$$

Le bovin concerné, qu'il s'agisse d'une vache ou d'un veau, ingère alors une quantité d'oocystes correspondant à  $O_{transmis}$  et qui est ensuite traitée par l'agent, comme nous le verrons dans la suite (III.4.4).

### III.4.2. Les Bouses

Le contact Bouse → Mouche, où la mouche se pose sur la bouse et se contamine, se réalise à partir de la quantité d'oocystes accessible en surface sur la bouse ( $O_{v,accessible}$ ) définie au III.3.1.b :

$$O_{v,t} = O_{v,t-1} + \text{Max}\left(\frac{O_{v,accessible}}{10}, \text{Binomiale}(O_{v,accessible}, 0, 8)\right)$$

#### Équation II.19

Où la quantité de parasites présente sur la mouche au temps t ( $O_{v,t}$ ) est fonction de la quantité d'oocystes viables présents à l'instant précédent ( $O_{v,t-1}$ ).

### III.4.3. Les Mouches

Trois contacts sont pris en compte : Mouche → Vache, Mouche → Veau, Mouche → Bouse

Pour chacun de ces contacts, nous définissons le nombre d'oocystes réellement transmis par la mouche ( $O_{transmis}$ ). De plus, nous supposons qu'au minimum 10% et en moyenne 50 % des oocystes de mouche sont transmis :

$$O_{transmis} = \text{Max}\left(\frac{O_v}{10}, \text{Binomiale}(O_v, 0, 5)\right)$$

Équation II.20

$O_v$  représente la quantité d'oocystes viables portée par la mouche. Le nombre d'oocystes transmis,  $O_{transmis}$ , est retranchée à cette quantité de parasites après transmission :

$$O_{v,t+1} = O_{v,t} - O_{transmis}$$

Équation II.21

La quantité d'oocystes transmise est ensuite acquise par l'agent concerné (Vache, Veau ou Bouse).

#### III.4.4. Les Bovins

Les bovins rejettent *Cryptosporidium* dans l'environnement via leurs déjections. La quantité d'oocystes que nous considérons accessibles sur une bouse ( $O_{transmis}$ ) dépend du poids de la bouse ( $PoidsBouse$ ) et de la quantité d'oocystes transmissibles ( $O_{transmissible}$ ). Cette quantité d'oocystes transmissibles représente le maximum d'oocystes pouvant être présents dans une bouse en fonction de son poids et de la quantité d'oocystes viables infectieux présents dans l'organisme du bovin qui produit la bouse ( $O_{v,i}$ ).

Nous déterminons tout d'abord  $PoidsBouse$  de la manière suivante :

$$PoidsBouse = \text{Max}(PoidsBouse_{MIN}, \text{Binomiale}(PoidsBouse_{MAX}, PPoidsBouse_{MOY}))$$

Équation II.22

$PoidsBouse_{MIN}$  et  $PoidsBouse_{MAX}$  représentent respectivement le seuil minimum et maximum du poids estimé d'une bouse.  $PPoidsBouse_{MOY}$  est la proportion de  $PoidsBouse_{MAX}$  représentant le poids moyen estimé d'une bouse.

Puis, nous en déduisons  $O_{transmissible}$  :

$$O_{transmissible} = PoidsBouse \times O_{v,i} \times P_{oocyste}$$

Équation II.23

$O_{v,i}$  est la quantité d'oocystes viables infectieux présente dans l'organisme des bovins.  $P_{oocyste}$  est la proportion des oocystes viables infectieux présentes dans l'organisme des bovins qu'il est susceptible de retrouver dans un gramme de matière fécale. Cette proportion s'élève à un pour mille pour les vache et à deux pour mille pour les veaux.

Enfin,  $O_{transmis}$  s'exprime de la façon suivante :

$$O_{transmis} = \text{Max}(\text{Limite inférieure}, \text{Binomiale}(n, p))$$

Équation II.24

Où *Limite inférieure* est la quantité minimale d'oocystes rejetés (fraction de  $O_{transmissible}$ ) et où *Binomiale*( $n, p$ ) a comme paramètres  $n$ , quantité maximale d'oocystes rejetés ( $O_{transmissible}$ ), et de paramètre  $p$ , quantité moyenne d'oocystes rejetés.

Cette quantité transmise d'oocystes est donc rejetée dans l'environnement et soustraite à la quantité initialement présente dans l'organisme des bovins :

$$O_{v,t+1} = O_{v,t} - O_{transmis}$$

Équation II.25

La quantité  $O_{transmis}$  est acquise par l'agent « bouse » correspondant comme indiqué au §III.3.1.b.

Les données, récapitulées dans le tableau ci-dessous, nous permettent de définir les limites inférieures présentes dans les formules de *PoidsBouse* et de  $O_{transmis}$ , ainsi que les paramètres des lois binomiales :

Agent	Quantité de matière fécale par jour	Nombre de bouses par jour	Quantité min de matière fécale par bouse	Quantité max. de matière fécale par bouse	Quantité moyenne de matière fécale par bouse	Quantité min d'oocystes rejetés par bouse	Quantité moyenne d'oocystes rejetés par bouse
Vache	4 kg	12	200g	700g	350g	5%	30%
Veau	2 kg	12	100g	300g	175g	5%	30%

Tableau II.5 : Données sur les Oocystes dans les Matières Fécales (Follet, 2005)

Nous en déduisons :

- Vache → Bouse : La vache défèque

$$PoidsBouse = \text{Max}(200, \text{Binomiale}(700, 0, 5))$$

$$O_{transmissible} = PoidsBouse \times O_{v,i} \times 1.10^{-4}$$

$$O_{transmis} = \text{Max}\left(\frac{O_{transmissible}}{20}, \text{Binomiale}(O_{transmissible}, 0, 3)\right)$$

- Veau → Bouse : Le veau défèque

$$PoidsBouse = \text{Max}(100, \text{Binomiale}(300, 0, 5))$$

$$O_{transmissible} = PoidsBouse \times O_{v,i} \times 2.10^{-4}$$

$$O_{transmis} = \text{Max}\left(\frac{O_{transmissible}}{20}, \text{Binomiale}(O_{transmissible}, 0, 3)\right)$$

## *IV. Simulation et Validation*

La construction d'une représentation d'un système complexe demande de formaliser des hypothèses sur le fonctionnement de ce système. L'objectif est alors d'obtenir un modèle représentant au mieux la partie du monde réel que nous voulons observer. Nous avons choisi de nous baser sur la représentation d'un écosystème semi-naturel (étable avec box, système laitier). Nous pouvons ainsi agir sur des aspects précis du système et étudier les répercussions de ces changements sur les éléments du monde réel qui nous intéresse. De cette manière, nous évitons de parasiter le modèle par trop de détails et nous nous préservons d'éventuelles divergences du modèle pouvant se révéler par l'introduction d'aspects du monde réel que nous ne maîtrisons pas totalement. Les échanges entre thématiciens et modélisateurs déterminent en grande partie les éléments à inclure en fonction des attentes et des contraintes de chacun.

Une des spécificités des SOA est leur capacité à représenter des dynamiques de systèmes complexes. Ils permettent donc d'explorer les conséquences de différents scénarii, de moyens à mettre en œuvre pour atteindre l'objectif choisi. Il est donc possible d'évaluer l'impact de chacun des paramètres indépendamment des autres dans l'occurrence d'événement précis. Il n'est cependant pas évident de valider le modèle obtenu. En effet, si les thématiciens d'un domaine font appel à des modélisateurs, c'est bien souvent parce qu'il est difficile de réaliser des expérimentations réelles. Les données pouvant servir formellement à la validation du modèle sont rares, voire inexistantes. C'est pourquoi les analyses conjointes du thématicien et du modélisateur sont essentielles pour opérer cette validation et pour apporter les réponses attendues sur le système simulé.

Nous avons simulé le flux d'oocystes de *C. parvum* en fonction de différents paramètres en nous basant sur les données numériques issues de notre travail bibliographique. Ces chiffres nous ont alors servi de base de validation. D'autre part, pour réaliser cette validation, différents scénarii ont été mis en place consécutivement et selon une démarche logique en collaboration avec les biologistes. L'objectif principal est de confirmer leurs hypothèses sur le fonctionnement du système réel par l'observation du comportement des simulations.

#### **IV.1. Mise en Place des Scénarii**

Les scénarii testés prennent comme postulat les conditions suivantes :

- Présence de 5 vaches, 5 veaux et 5 mouches; les vaches et les veaux ayant chacun un niveau d'immunocompétence propre (EIC = Etat d'ImmunoCompétence compris entre 0 et 1).

Vache n°	1	2	3	4	5	Veau n°	1	2	3	4	5
EIC	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	EIC	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6

**Tableau II.6 : Agents présents lors des Scénarii**

- Absence de parasite en début de simulation sur les vaches, les veaux ou les mouches.
- Absence de contact entre les veaux et les vaches (box dans une étable).
- Nettoyage de l'étable une fois par jour : élimination des oocystes dans l'environnement.
- Temps de simulation : 10 jours.

Les scenarii peuvent être regroupés en six catégories :

- ↪ **Scénario A** : Introduction des oocystes par l'eau. Le seul apport d'oocystes se fait par l'eau : 5 oocystes par litre en flux continu.
- ↪ **Scénario B** : Introduction des oocystes par les mouches. L'apport d'oocystes se fait par les mouches : 10 oocystes par mouches soit un total de 50 oocystes.
- ↪ **Scénario C** : Introduction des oocystes par les vaches. Chaque vache porte 10 oocystes soit un total de 50 oocystes.
- ↪ **Scénario D** : Introduction des oocystes par un 6<sup>e</sup> veau. 50 oocystes sont amenés par un veau extérieur à l'étable. L'EIC de ce 6<sup>e</sup> veau varie de 0,2 à 0,6.
- ↪ **Scénario E** : Introduction des oocystes par un veau de l'étable : 50 oocystes sont apportés par le veau ayant un EIC de 0,2.
- ↪ **Scénario F** : Variation du nombre d'oocystes apportés par un veau interne à l'étable (veau 1; EIC = 0,2). Différentes quantités d'oocystes sont testées : 25, 50, 75, 100, 500 et 1000 oocystes.

L'établissement de ces scenarii ne s'est pas fait au hasard : nous avons voulu mettre en place une démarche logique. L'objectif est d'évaluer les réactions du système au changement des paramètres initiaux.

Nous souhaitons comprendre quelle est l'influence du vecteur initial du parasite sur le devenir du système indépendamment du nombre d'oocystes apportés au départ. Nous envisageons donc l'arrivée du parasite par l'eau et par les mouches mais également par un veau alternativement externe ou interne au troupeau initial. Dans ce dernier cas, nous évaluons également les répercussions que peut avoir les changements, d'une part, de l'état de santé du veau vecteur (EIC) et, d'autre part, du nombre de parasites amenés par un veau à EIC constant.

Dans la suite de cette partie, nous étudions en détail chacun de ces scenarii et nous effectuons, par l'analyse des résultats obtenus, la validation des hypothèses des biologistes. Nous montrons également ce que le modèle nous a appris sur la circulation du flux de parasites dans le système étudié.

## IV.2. Résultats des Simulations

Les tableaux, regroupant les résultats expérimentaux par scénario et par agent, sont répertoriés en Annexe 2.

### IV.2.1. Scénarii A et B

↳ Rappel des conditions expérimentales :

- Présence de 5 vaches, 5 veaux et 5 mouches; les vaches et les veaux ayant chacun un niveau d'immunocompétence propre (EIC = Etat d'ImmunoCompétence compris entre 0 et 1).

Vache n°	1	2	3	4	5
EIC	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0

Veau n°	1	2	3	4	5
EIC	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6

- Temps de simulation : 10 jours.
- Le scénario est répété 20 fois (20 simulations).
- Le scénario A concerne l'arrivée des oocystes par l'eau : 5 oocystes par litre en flux continu.
- Le scénario B concerne l'arrivée des oocystes par les mouches : 10 oocystes par mouches (50 oocystes au total).

Par les scénarii A et B, nous observons que le cheptel de l'étable peut être infecté par *C. parvum*, que les oocystes soient véhiculés par l'eau ou par les mouches. Plus particulièrement, dans le système actuel, les vaches adultes, quelque soit leur EIC, présentent toujours un « bruit de fond » ( $50 \pm 16$  oocystes), sans jamais atteindre une quantité de parasites suffisante pour entraîner la mort. Par contre, chez les veaux dont l'EIC est inférieur à 0,4, les parasites se développent jusqu'à atteindre une dose létale. En ce qui concerne les veaux dont l'EIC est supérieur à 0,4, ils développent la maladie sans jamais atteindre la dose mortelle. L'observation, durant les simulations, de l'évolution de la charge parasitaire suggère même que ces animaux guérissent. De plus, la vache 1 et le veau 5 ont le même EIC (0,6), les quantités d'oocystes portées ne sont pourtant pas les mêmes (et ceci pour chaque scénario). Nous observons une

résistance du veau d'EIC 0,6 contrairement aux autres veaux. Cependant, la quantité d'oocystes observée reste supérieure à celle de la vache 1. L'EIC de l'hôte ainsi que la maturation du système immunitaire semble donc jouer un rôle dans le développement de la parasitose, du moins selon le modèle actuellement développé.

### *IV.2.2. Scénario C*

↳ *Rappel des conditions expérimentales :*

- Présence de 5 vaches, 5 veaux et 5 mouches.
- Temps de simulation : 10 jours.
- Le scénario est répété 20 fois.
- Le scénario C concerne l'arrivée des oocystes par les vaches : chaque vache porte 10 oocystes en début de simulation (soit un total de 50 oocystes).

Lorsque le vecteur du parasite est représenté par une vache adulte dont l'EIC est supérieur à 0,6 (scénario C), le « bruit de fond » observé précédemment chez les bovins adultes est ici inexistant. Ceci suggèrerait une élimination des oocystes ou une perte de viabilité parasitaire due au système immunitaire de la vache vectrice. De même, le nombre d'oocystes alors retrouvé chez les veaux de l'étable est très faible voire nul dans 93% des cas. La dissémination par les mouches est ici largement amoindrie puisque l'accessibilité aux oocystes dans la matière fécale est faible voire nulle.

### *IV.2.3. Scénario D*

↳ *Rappel des conditions expérimentales :*

- Présence de 5 vaches, 5 veaux et 5 mouches.
- Temps de simulation : 10 jours.
- Le scénario D concerne l'arrivée des oocystes par un sixième veau dont l'EIC est variable : 50 oocystes sont amenés par un veau extérieur à l'étable, l'EIC de ce 6<sup>ème</sup> veau varie de 0,2 à 0,6.

- Le scénario est répété 20 fois à chaque changement d'EIC du 6<sup>ème</sup> veau.

A partir du scénario C, il est mis en évidence que l'EIC du vecteur a un rôle non négligeable. Afin de confirmer cette observation, le scénario D a été élaboré en utilisant un 6<sup>ème</sup> veau porteur d'un nombre constant d'oocystes (50) et d'EIC variable (0,2 ;0,3 ;0,4 ;0,5 ;0,6). Tant que le porteur présente un EIC inférieur à 0,4, le risque de mortalité pour les veaux d'EIC faible (0,2 et 0,3) est important. Tandis que les veaux d'EIC supérieur à 0,4 ou encore les vaches adultes présentent un développement parasitaire sans jamais atteindre la dose létale. Toutefois, à partir du moment où le veau porteur initial du parasite présente un EIC supérieur à 0,4, le développement parasitaire dans l'écosystème « étable » ne présente plus de niveau létal même pour les veaux du cheptel ayant un EIC faible.

Qui plus est, les taux parasitaires moyens retrouvés chez les vaches adultes sont très faibles (moins de 20 parasites quand l'EIC du veau est de 0,4, et nul dans 90% des cas quand l'EIC du veau porteur est supérieur ou égal à 0,5). Ceci confirmerait donc que, d'après notre modèle, l'EIC du vecteur chez lequel le parasite se développe est un facteur important dans la dissémination du parasite.

#### *IV.2.4. Scénario E*

↳ *Rappel des conditions expérimentales :*

- Présence de 5 vaches, 5 veaux et 5 mouches.
- Temps de simulation : 10 jours.
- Le scénario est répété 20 fois.
- Le scénario E concerne l'arrivée des oocystes par un veau interne à l'étable : 50 oocystes sont apportés par le veau 1 dont l'EIC est égal à 0,2.

Le scénario E nous montre que, malgré la capacité du vecteur à permettre la multiplication du parasite, l'amplification du nombre d'oocystes, et donc la quantité de parasites présents au sein de l'animal, n'influe pas sur le devenir final du troupeau. En effet, dans le cas où l'individu vecteur est un veau d'EIC 0,2, le résultat est alors le même qu'avec un apport d'oocystes par l'eau ou les mouches : la contamination conduit à un portage par tous les autres individus, voire à la mort des veaux ayant un EIC inférieur à 0,4.

#### *IV.2.5. Scénario F*

↳ *Rappel des conditions expérimentales :*

- Présence de 5 vaches, 5 veaux et 5 mouches.
- Temps de simulation : 10 jours.
- Le scénario F concerne l'arrivée des oocystes par un veau interne à l'étable (veau n°1; EIC = 0,2) : Variation de la quantité d'oocystes apportée (de 25 à 1000 oocystes).
- Le scénario est répété 20 fois à chaque changement de la quantité d'oocystes apportée par le veau n°1.

Le scénario F vise à déterminer l'importance du nombre de parasites présents dans le veau porteur initial (d'EIC 0,2) sur le risque de cryptosporidiose dans le cheptel de l'étable.

Les résultats obtenus confirment l'hypothèse suggérée dans le scénario D. En effet, nous constatons que quelque soit le nombre de *Cryptosporidium* apportés par le veau (25 ou 1000 oocystes), le devenir des veaux de faible EIC (inférieur à 0,4) n'est pas modifié : ils développent une cryptosporidiose létale. Le développement parasitaire chez les autres animaux de l'étable n'est que peu altéré quelque soit la quantité d'oocystes arrivant. Un veau d'EIC 0,4 présente une charge parasitaire d'environ  $3,1 \cdot 10^5 \pm 2,7 \cdot 10^5$  oocystes, et un veau d'EIC 0,6 a une charge parasitaire d'environ  $1,1 \cdot 10^2 \pm 0,4 \cdot 10^2$  oocystes.

De même, chez les vaches adultes, les quantités d'oocystes retrouvées ne sont pas modifiées par la quantité initiale de parasites présents chez le veau vecteur puisqu'elles sont en moyenne de  $45 \pm 21$  oocystes, valeur de même ordre de grandeur que pour les scénarii A et B (arrivée des oocystes par l'eau et les mouches :  $75,5 \pm 36,5$  oocystes). Il semblerait donc que ce ne soit pas le nombre de parasites qui arrive initialement dans le système qui soit important, mais l'EIC de l'hôte chez lequel il se développe.

### **IV.3. Conclusion**

Depuis quelques années, l'évaluation du risque lié à la présence de *Cryptosporidium* dans l'environnement représente un pôle d'intérêt croissant. Des auteurs comme Pouillot *et al.* (Pouillot, Beaudou, Denis, & Derouin, 2004) ont développé une méthode d'évaluation des risques concernant la population humaine française. La modélisation informatique, qui a été réalisée dans le travail que nous venons de développer, concerne davantage un problème d'épidémie en milieu d'élevage. La présentation de ce travail aux experts du domaine (biologistes épidémiologistes, parasitologues), nous a apporté les éléments nécessaires à sa validation et a permis de confirmer que le modèle pourra être adapté par la suite à une problématique touchant la santé humaine.

Le choix d'un écosystème fermé comme celui d'une étable a été fait pour apporter des réponses rapidement aux biologistes sur le comportement global et simplifié du système. Il est préférable d'augmenter progressivement et par étape le niveau de détail. Modéliser un écosystème complet pour lequel la recherche de données prendrait un temps considérable et dont la représentation pourrait diverger, nous éloignerait probablement de la réalité et certainement des objectifs recherchés. Afin de construire notre modèle, de nombreuses hypothèses de travail ont donc dû être posées et restent discutables. Pour toutes ces hypothèses, une évaluation du risque a été prise en compte. Toutes les hypothèses ont été apportées à partir des données de la littérature et des connaissances des experts (AFSSA 2: Derouin, Beaudou, Pouillot, & Roze, 2002).

A la vue des résultats obtenus, le modèle semble reproduire de manière fidèle la circulation de *Cryptosporidium* dans cet environnement restreint qu'est l'étable. En effet, les résultats qualitatifs concernant le rôle de l'EIC par rapport au développement parasitaire corroborent les données bibliographiques. Ainsi, chez l'Homme, des études montrent un portage asymptomatique de l'ordre de 0,4 à 3% selon l'âge des individus (Holten-Andersen, Gerstoft, Henriksen, & Pedersen, 1984; Isaacs, 1985; Mata, Bolanos, Pizarro, & Vives, 1984; Tzipori, Smith, Birch, Barnes, & Bishop, 1983).

Le niveau d'EIC semble ici avoir un rôle non négligeable dans la dissémination du parasite. Des observations similaires ont déjà été réalisées concernant la propagation d'un autre parasite (*Pneumocystis carinii*) : des hôtes immunocompétents sont capables de véhiculer le parasite sans pour autant développer la maladie. Le développement de la charge parasitaire nécessite alors une immunodépression (Dumoulin, Guyot, Lelièvre, Dei-Cas, & Cailliez, 2000). De plus, une valeur d'EIC égale à 0,4 paraît représenter un seuil : les veaux sont capables de s'infecter, de développer la maladie, de se guérir puis d'être à nouveau malades sans jamais éliminer totalement les oocystes de *Cryptosporidium*.

Associée à cette notion d'EIC, la nature de l'apport de parasites s'avère également avoir un rôle dans la dissémination des oocystes. En effet, la multiplication du parasite est d'autant plus importante si cet apport se fait par une entité chez qui le pathogène est capable de se multiplier. Ainsi, les hôtes ayant un faible EIC (les veaux, en l'occurrence) favorisent la dissémination contrairement aux hôtes ayant un EIC plus fort (les vaches adultes). L'EIC paraît ainsi corrélé à la capacité de l'hôte à éliminer le parasite et semble avoir une influence sur la viabilité de ce parasite. Le système immunitaire des animaux permettrait l'élimination de *Cryptosporidium* et donc l'excrétion des oocystes en serait amoindrie. Harp *et al* (Harp, Woodmansee, & Moon, 1990) montrent que le développement de la cryptosporidiose est différent selon l'âge auquel les parasites sont inoculés. De plus, il apparaît que les animaux deviennent résistants après plusieurs contacts avec le pathogène.

Cependant, il manque une corrélation évidente entre la réponse humorale<sup>25</sup> des animaux et leur résistance à l'infection par *C. parvum*. Dans le cas de la cryptosporidiose humaine, l'état immunitaire semble jouer un rôle protecteur par l'augmentation de la dose infectante (DI50) (Chappell, Okhuysen, Sterling, Wang, Jakubowski, & Dupont, 1999; Okhuysen, Chappell, Crabb, Sterling, & DuPont, 1999). A travers notre modèle, les individus dont l'EIC est supérieur ou égal à 0,4 éliminent une partie des oocystes tout en gardant une quantité minimale.

La modélisation ainsi réalisée, nous a également permis de montrer que la quantité d'oocystes apportée par un veau n'a que peu d'influence sur la survie des veaux du cheptel. Le même type d'observations a pu être réalisé à partir d'infections expérimentales humaines (Chappell, Okhuysen, Sterling, Wang, Jakubowski, & Dupont, 1999) : aucune corrélation claire n'a pu être mise en évidence entre le nombre de parasites ingérés, la gravité des symptômes et la quantité d'oocystes excrétés.

Nous constatons donc que le point clé de l'analyse est l'évaluation de l'EIC. La corrélation entre EIC et âge des bovins est ici sous-jacente. En effet, toutes les informations apportées lors de l'édification du programme sont énoncées en fonction de l'âge des veaux. Cependant, il serait intéressant de connaître la corrélation avec l'EIC afin de mieux comprendre comment circulent les oocystes de *Cryptosporidium* au sein des jeunes animaux.

Dans cette étude, le rôle des Diptères dans la dissémination du parasite est également mis en évidence. En effet, les bovins étant séparés les uns des autres sans aucun contact possible, seules les mouches permettent la dissémination des oocystes après contact avec la source d'oocystes lors de l'arrivée d'un veau contaminé dans l'étable (scénario D ou E). Ces observations viennent corroborer le transport passif d'oocystes déjà envisagé par Grazyck *et al.* (Graczyk, Knight, Gilman, & Cranfield, 2001).

---

<sup>25</sup> La **réponse immunitaire humorale** est caractérisée par la production d'anticorps par les lymphocytes B. Ces anticorps sont efficaces contre les agents pathogènes circulant dans le sang et la lymphe. De plus, l'activation sélective des lymphocytes B dote l'organisme de cellules mémoires à durée de vie prolongée qui interviennent dans la réponse immunitaire secondaire.

Le modèle actuel, nous permet donc de mettre en évidence l'importance de l'EIC dans la circulation de *Cryptosporidium* sp. ainsi que le rôle du vecteur initial du parasite. Bien que l'approche quantitative soit aujourd'hui difficile à avérer, l'aspect qualitatif du flux des oocystes dans le système semble bien corrélé avec la réalité des faits. Ces aspects quantitatifs sont corroborés par la littérature et par les avis des thématiciens. Afin de faire évoluer notre modélisation, il est maintenant indispensable de valider les données obtenues par des expérimentations plus proches de notre modèle ; la mise en place et l'adaptation de scénarii apparentés à la littérature correspondante, nous permettra ainsi d'avoir des bases de comparaisons.

## V. Evolutions du Modèle

L'outil de simulation informatique, qui a été mis au point dans le cadre de ce travail, permet de simuler la circulation des oocystes dans un environnement artificiel. Il s'agit d'un élevage bovin, dont il est possible de choisir les paramètres notamment le nombre de vaches et de veaux tout en déterminant pour chaque animal le niveau d'immunocompétence (EIC). La validation du modèle se fait au fur et à mesure de son utilisation et des tests pratiqués par les biologistes, alors même qu'il évolue en fonction des données que nous ajoutons.

Les résultats des premières simulations soulignent déjà le rôle important que peuvent jouer les insectes (en l'occurrence, les mouches) dans la transmission du parasite aux animaux présents dans l'élevage. Il apparaît alors évident que l'eau n'est plus le seul élément vecteur à contrôler en cas d'infection par *Cryptosporidium* ; le nombre d'oocystes transportés par les insectes qui fréquentent l'élevage pourrait, à lui seul, être à l'origine de la survenue d'un épisode de cryptosporidiose (Graczyk, et al., 2000; Graczyk, Grimes, Knight, Da Silva, Pieniazek, & Veal, 2003)

L'utilisation d'une SOA présente l'intérêt supplémentaire d'amener le thématicien à envisager des pistes de réflexion que l'étude de systèmes réels ne lui permet pas habituellement de considérer. Pour un élevage donné, dans des conditions où un nombre précis de paramètres change, il est possible de voir si l'évolution du système est récurrente, en termes de dissémination des parasites, ou différente, voire diamétralement opposée. Par exemple, l'entrée d'un nombre déterminé d'oocystes dans l'élevage pourrait engendrer, au bout d'un certain temps, une répartition des parasites qui soit différente selon que ces oocystes soient arrivés par l'eau, par les insectes ou par un veau contaminé. Deux voies d'entrée parasitaire pourraient faire évoluer le système de la même manière alors que la troisième voie donnerait un résultat très différent. La SOA n'est alors plus seulement un outil de simulation ayant uniquement une qualité prédictive mais devient un outil d'expérimentation nous permettant d'explorer de multiples configurations du système.

Les interactions entre le thématicien, le modélisateur et l'informaticien permettent alors d'imaginer de nouveaux scénarii ou de mettre en avant les faiblesses et les manques du modèle initial. Ces échanges sont essentiels pour s'assurer que le modèle correspond bien aux besoins initiaux du thématicien et pour répondre de manière efficace à ses questions.

Les différents dialogues qui ont eu lieu à la suite de la réalisation des différents scénarii évoqués, ont mis en évidence la possibilité d'apporter des améliorations au modèle. Ce modèle est d'une part amené à se développer comme un outil d'aide à la décision autonome (c'est ce que nous verrons au Chapitre III), mais il doit aussi évoluer pour que les simulations expérimentales se rapprochent le plus possible de la réalité.

Après la validation de la SOA, les biologistes ont donc mis l'accent sur les attributs perfectibles du premier modèle en rapport avec des aspects du monde réel pouvant éventuellement influencer la propagation du parasite. L'évolution du modèle a été envisagée selon trois thèmes : L'environnement, l'organisme des bovins et l'aspect quantitatif.

#### ↳ **L'environnement :**

- *Reproduction des mouches* : dans le modèle développé, le nombre de mouches reste constant durant la simulation. La reproduction des mouches n'est donc pas prise en compte. Ce phénomène de multiplication pourrait influencer la dissémination du parasite. Le cas échéant, leur taux de mortalité doit être estimé.
- *Saisonnalité* : l'activité des mouches, comme celle des bovins, dépend de paramètres fonctions des saisons. La température et l'hygrométrie sont les facteurs prépondérants à prendre en compte dans notre modèle.

- *Adaptabilité des paramètres* : la propagation du parasite est fonction du type d'exploitation. A chaque variante d'exploitation recensée sont associées des caractéristiques précises en particulier l'isolement des bovins. Le contact entre vaches et veaux est alors envisageable (étable sans box, vache allaitant, etc.).
- *Représentation spatiale* : l'interface actuelle ne donne pas de représentation explicite du mouvement des acteurs. L'intégration d'une représentation graphique de ces mouvements pourrait ajouter un complément d'information en passant par l'analyse visuelle du flux de parasites échangés.

#### ↳ **L'organisme des bovins :**

- *L'Etat d'ImmunoCompétence (EIC)* : l'EIC reste constant durant la simulation. Or, nous pouvons imaginer qu'il puisse évoluer conjointement avec la progression de la maladie chez les bovins (i.e. avec le nombre de parasites présents dans l'organisme) ainsi qu'avec la maturité de leur système immunitaire (i.e. avec leur âge).
- *Symptomatologie* : il est difficile de trouver, dans la littérature, une interprétation concrète de l'EIC en termes physiologiques. Pour les biologistes, cette notion ne correspond pas à une variable réelle unique, quantifiable ou aisément transposable. Les règles qui régissent cet état ne sont pas formelles et nécessitent, de part leur caractère incertain l'introduction de règles floues.

## ↳ L'aspect quantitatif du modèle :

- Lors de la conception du logiciel actuel, nous nous sommes basés, pour un certain nombre de paramètres, sur des données issues d'études faites sur l'Homme. Nous nous sommes donc, focalisés essentiellement sur l'aspect qualitatif du modèle pour le valider. Des expérimentations, afin de remplacer les valeurs empruntées, permettraient, à terme, d'avoir une idée plus juste du nombre de parasites échangés et développés.

Dans la suite, nous donnons quelques précisions concernant les évolutions apportées au modèle en reprenant celles-ci point par point.

## **V.1. L'Environnement**

### ***V.1.1. Mouche et Reproduction***

Le modèle de la circulation de *Cryptosporidium* que nous avons décrit ne prend pas en compte la reproduction des mouches. Il n'est pas erroné pour autant ; de fait, les agents « mouches » de notre simulation sont représentatifs de l'ensemble des diptères et des insectes susceptibles de véhiculer le parasite dans une étable. Par ailleurs, leur nombre peut être considéré comme peu fluctuant par animal présent dans l'étable.

Les biologistes ont néanmoins émis le souhait de pouvoir représenter leur reproduction afin de pouvoir en maîtriser les aspects et d'observer son impact.

La mouche s'est parfaitement adaptée à toutes les régions du monde au climat tempéré. Elle aime la chaleur et s'abrite dès que la température commence à baisser. En dessous de 7°C, elle entre dans un état de torpeur. A moins de 5°C, elle meurt.

C'est surtout dans le fumier des animaux, mais aussi sur tout aliment en décomposition susceptible d'apporter chaleur et humidité, que la mouche pond ses œufs. La femelle vit à peine plus de deux semaines mais pond 4 à 5 fois durant ce court laps de temps. Elle dépose à chaque fois de 50 à 150 œufs. L'incubation est très rapide et surtout en période chaude où elle ne dure que 8 heures. En période tempérée, les larves (ou asticots) sortent des œufs 24 heures plus tard. Ces larves atteignent leur forme adulte après avoir quitté une enveloppe appelée « puparium ».

Le cycle complet (œuf, larve, nymphe Figure II.5) se déroule normalement sur un mois mais peut être réduit, en période de fortes chaleurs, à une dizaine de jours. L'espèce possède donc de stupéfiantes facultés de reproduction. Une mouche adulte qui pond ses premiers œufs au mois d'avril pourrait avoir au mois d'août plus de  $1,9.10^{1020}$  descendants, si tous avaient vécu et procréé.

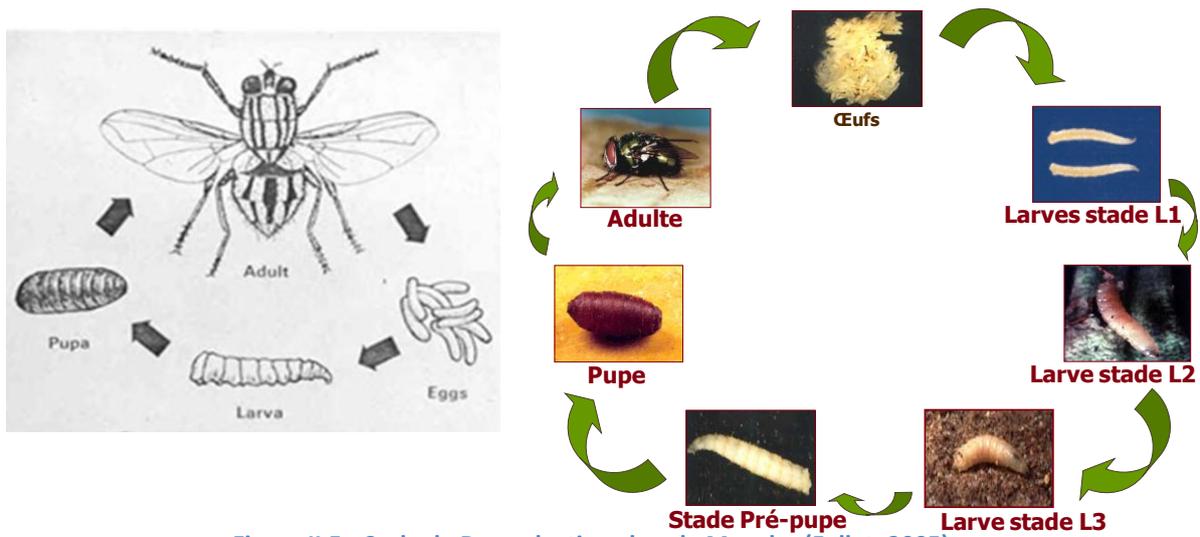


Figure II.5 : Cycle de Reproduction chez la Mouche (Follet, 2005)

Pour notre modèle, nous considérons que la durée de vie d'une mouche est de 15 jours en moyenne et qu'elle est capable de pondre environ tous les trois jours (au maximum cinq fois dans sa vie). A chaque fois qu'une mouche se pose sur une bouse, nous considérons donc qu'il est possible qu'elle y pondre, avec un certain degré de probabilité, un nombre d'œufs aléatoirement déterminé entre 50 et 150. Une fois la ponte effectuée, elle n'aura plus lieu avant au minimum trois jours ; puis, après ces trois jours, elle est à nouveau susceptible de pondre et le cycle recommence.

Il n'y en a qu'une partie des œufs pondus qui est viable : le nombre d'œufs viables dépend des conditions de température et d'humidité (voir les détails au §V.1.2). De plus, nous avons vu que les bovins rejettent les parasites dans leurs déjections. Par conséquent, les mouches issues de la reproduction (i.e. sorties des déjections) portent une quantité initiale d'oocystes ( $O_i$ ) fonction du nombre de parasites viables infectieux accessibles contenus dans les bouses ( $O_{v,accessible}$ ). Nous déterminons  $O_i$  de la manière suivante :

$$O_i = \text{Max} \left( \frac{O_{v,accessible}}{10}, \text{Binomiale}(O_{v,accessible}, 0, 8) \right)$$

Équation II.26

Si nous nous arrêtons là dans la représentation du système réel, le nombre de mouches augmente de manière exponentielle dans l'étable, ce qui ne correspond pas à la réalité. De fait, il faut prendre également en compte la mortalité des mouches ainsi que la possibilité qu'elles sortent de l'étable pour ne plus revenir (manque de nourriture).

A tout instant, la mouche est donc susceptible de sortir de l'étable ou de mourir. La probabilité qu'une mouche sorte de l'étable est la même pour toutes les mouches et dépend de leur nombre dans l'étable à l'instant en question. Plus ce nombre est grand plus elles ont tendance à sortir et inversement. La probabilité que les mouches sortent est alors proportionnelle à leur densité de présence dans l'étable.

Une mouche peut mourir de vieillesse ou à cause de phénomènes extérieures (piétinements des vaches par exemple). Ainsi, il y a une probabilité que la mouche meurt à chaque instant dès sa naissance. D'autre part, à partir de son treizième jour de vie, la mouche est également susceptible de mourir de vieillesse. La probabilité d'une mort naturelle augmente alors proportionnellement avec l'âge de la mouche.

### V.1.2. Saisonnalité

De nombreux paramètres sont liés la saisonnalité. Cette dépendance est observable sur le cycle circadien<sup>26</sup> des agents, particulièrement au niveau de la fréquence des contacts ainsi que sur la reproduction de la mouche.

Nous allons exposer ici les données dont nous nous sommes servis pour la mise en place du modèle des températures. L'objectif de cette modélisation est de pouvoir laisser le choix à l'expérimentateur des conditions de température et d'humidité dans lesquelles il souhaite faire évoluer la simulation. Ainsi, la période de l'année choisie influence l'évolution des simulations en agissant sur le comportement des individus y prenant part.

Il est également important de noter les disparités importantes entre les différents types de climats, ne serait-ce qu'en France. Les climats dont nous avons tenu compte sont au nombre de cinq :

- *Climat océanique* : caractérisé par des hivers doux (10°C en moyenne) et très humides, marqués par des pluies intermittentes. L'été, le temps est beaucoup plus sec mais très frais (pas plus de 23 °C en moyenne).
- *Climat océanique dégradé* : climat océanique pouvant subir des influences continentales venant de l'Est de l'Europe qui se traduisent, le plus souvent, par des températures très froides pendant un certain temps, en hiver et le contraire en été.
- *Climat continental* : il s'agit d'un climat brutal à cause de températures variant sans cesse d'une saison à l'autre. Ainsi, en hiver, nous pouvons relever des températures de l'ordre de 0°C et en été de plus de 30 °C. les précipitations sont plus élevées en été avec de nombreux orages et de la neige en hiver.

---

<sup>26</sup> Le **cycle circadien** représente l'ensemble des comportements chrono-biologiques qui s'étalent sur 24 heures.

- *Climat méditerranéen* : climat inégal sur le plan des précipitations. De fait, elles sont très fortes au printemps et en automne et sont quasi inexistantes le reste de l'année. Les températures sont très chaudes en été (jusqu'à 40 °C) et douces en hiver (16-17 °C).
- *Climat montagnard* : il s'agit d'un climat très hétérogène. Il peut faire froid pendant un ou deux jours et très chaud le troisième jour. Il en est de même pour les précipitations.

Afin de recueillir des données caractéristiques de ces différents climats, nous leurs avons associé une ville de France représentative de chacun d'entre eux : Nantes (océanique), Paris (océanique dégradé), Strasbourg (continental), Toulouse (méditerranéen), Chambéry (Montagnard). Les données Météo France que nous avons obtenues concernent l'année 2005 et représentent un relevé journalier de la température maximale, minimale et moyenne dans chaque ville et pour chaque mois. Concernant l'hygrométrie, les relevés étaient également journaliers.

En outre, il nous a semblé important de représenter les variations de températures observées entre le jour et la nuit. Il nous a donc fallu modéliser l'heure de lever et de coucher du soleil ; nous avons obtenu par Météo France ces heures pour le 21 de chaque mois sur plusieurs années (car les solstices ont lieu les 21 du mois de juin et du mois de décembre). Nous moyennons ces valeurs afin de réaliser deux interpolations de Lagrange par intervalles<sup>27</sup> pour obtenir deux courbes par type de climats donnant l'heure de lever et l'heure de coucher du soleil en fonction de la date.

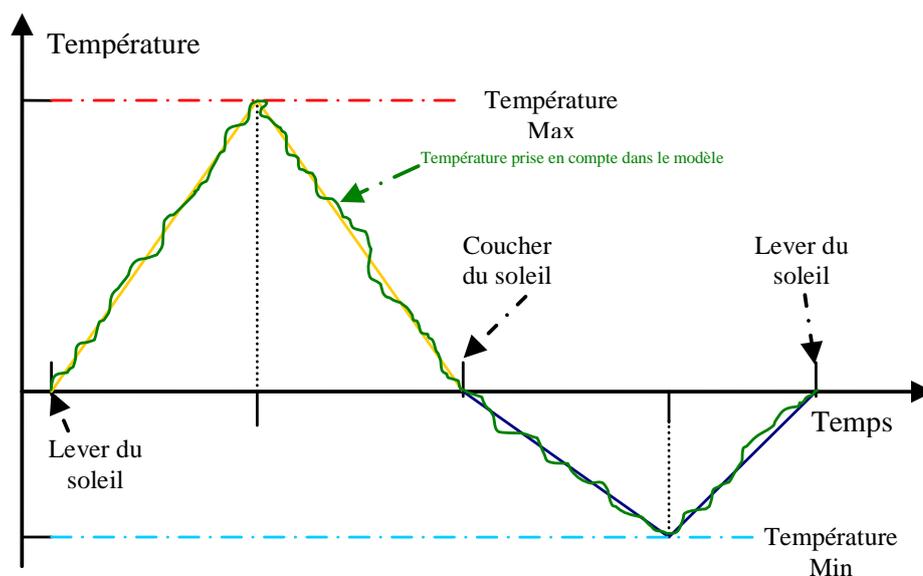
---

<sup>27</sup> Soient  $n$  points distincts  $x_0, x_1, \dots, x_n$  d'un intervalle fermé borné  $[a,b]$  de  $\mathbb{R}$ , et une fonction  $f$  définie sur  $[a,b]$  à valeurs dans  $\mathbb{R}$ , il existe un polynôme  $P$  unique tel que  $P(x_i) = f(x_i)$  pour  $i = 0, 1, \dots, n$ . Ce polynôme est donné par :

$$P(X) = \sum_{i=0}^n \left( f(x_i) \times \prod_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n \frac{X - x_j}{x_i - x_j} \right)$$

Lorsque le degré du polynôme est supérieur ou égale à 4, la fonction peut osciller. Pour résoudre ce problème, il est possible d'utiliser la méthode d'interpolation par intervalles. Cela consiste à constituer plusieurs polynômes réduits à des degrés valant au plus 3. Il s'agit alors de raccorder les différents polynômes obtenus par continuité aux points d'intersection. Nous obtenons alors une fonction polynomiale par intervalles.

De plus, afin que le modèle des températures et de l'humidité suive une progression logique entre le jour et la nuit, nous avons défini une méthode de calcul « semi-aléatoire ». L'évolution de la température est linéaire par morceaux. Nous considérons quatre phases dans l'évolution de la température (Figure II.6). Ces phases sont conditionnées par l'heure de levé et de couché du soleil (où la température équivaut à la température moyenne que nous avons relevée) et par les heures où la température est considérée maximale le jour et minimale la nuit. Les températures minimales et maximales sont obtenues grâce aux données décrites ci-dessus et les heures, définissant les sommets de température, sont définies aléatoirement par une loi binomiale autour de 13 Heure pour le jour et de 2 Heure pour la nuit. Nous associons également la température acquise par cette progression linéaire à une loi binomiale afin d'obtenir une valeur aléatoire (Figure II.6).



**Figure II.6 : Représentation de l'Évolution de la Température**

Les variations jour / nuit ainsi que les variations climatiques influencent le comportement des agents du modèle et, indirectement, la propagation du parasite. La nuit, il y aura par exemple une diminution des déplacements de la mouche dans l'étable. Cette réduction des déplacements induit alors une diminution de la fréquence des contacts avec les différents agents présents dans l'étable (vache, veau, bouse), et donc du flux général de parasites dans le système.

La reproduction des mouches est alors moindre, d'autant plus que la période nécessaire à une mouche pour devenir adulte est également fonction de la température : plus il fait chaud et humide plus le laps de temps entre l'œuf et la mouche adulte est court.

La tombée de la nuit conduit également à une diminution de la fréquence des interactions entre les autres agents du modèle : vaches → veaux, vaches → abreuvoir, veaux → abreuvoir. Les bovins vont s'abreuver en fonction de la température et à des fréquences différentes entre le jour et la nuit. L'intervalle de temps moyen entre deux abreuvements est de 2 heures et varie entre 1 heure et 3 heures proportionnellement à la température.

Tous ces changements de comportements des agents en fonction des paramètres de saisonnalité se répercutent de façon significative sur la dissémination du parasite et peuvent se révéler être des facteurs importants dans la propagation de *Cryptosporidium*. Cependant, la comparaison avec des expérimentations réelles semble être nécessaire pour la validation de l'impact et des répercussions de ces paramètres. Aucune donnée n'est actuellement disponible dans la littérature qui puisse appuyer formellement les résultats obtenus. Des simulations sont actuellement mises en place en collaboration avec les biologistes dans l'objectif de valider cette partie de la modélisation par l'évaluation du comportement qualitatif du système artificiel par rapport aux connaissances que nous avons du système réel.

### ***V.1.3. Adaptabilité des Paramètres***

Les relations entre l'élevage bovin et l'environnement sont fortement influencées par le type de production (vaches laitières, vaches allaitantes, veaux de boucherie, veaux de batterie, bœufs, génisses d'élevage, génisses à viande,...).

La caractérisation des élevages bovins (Chatellier, Colson, Guesdon, Kempf, Legendre, & Perrot, 1997) est d'autant plus difficile à conduire que les exploitations bovines sont souvent multi-produits (combinaisons élevage bovin / grandes cultures / hors-sol, etc.) et que les systèmes productifs sont fortement diversifiés d'une région à l'autre (bovins allaitants élevés de manière extensive, ateliers d'engraissement de veaux de boucherie ou laitiers spécialisés, etc ...). Cette diversité se manifeste également au travers du milieu exploité, des méthodes de production, du degré de spécialisation des exploitations et du mode d'alimentation des animaux (pâturage, foin, ensilage d'herbe, ensilage de maïs, céréales, aliments concentrés) (Lensink & Leruste, 2006).

En ce qui concerne *Cryptosporidium*, le mode d'élevage des animaux peut intervenir à différents niveaux : selon le type d'élevage (système allaitant ou laitier), la méthode d'élevage (traditionnel ou industriel), le type d'exploitation (nombre d'animaux, taille des parcs, maîtrise des effluents) ou encore la localisation de l'exploitation. Il est évidemment difficile de rendre compte de toutes ces disparités dans notre modèle. De plus, leur action n'est pas forcément quantifiable et réellement significative en termes de dissémination du parasite. Notre attention s'est alors portée plus particulièrement sur les distinctions observées entre les élevages de type laitier et ceux de type allaitant afin de permettre le choix entre ces deux modes d'élevage à l'expérimentateur. Leurs propriétés sont répertoriées dans le Tableau II.7.

Système allaitant	Système laitier
Vêlages en été ou en hiver	Vêlages synchronisés par insémination artificielle en automne
Colostrum pendant maximum 12h Contact entre veau et mère jusqu'au sevrage ⇒ de 2 à 6 mois	Séparation veau-vache dès la naissance
Mise en pâturage du 15 avril au 15 novembre en moyenne	Séparation des veaux (pas de contact veau-veau) Veaux mâles vendus à 8 jours pour engraissement
Prévalence de 23,3%	Prévalence de 16,9%

**Tableau II.7 : Comparaison entre Système Allaitant et Système Laitier (Follet, 2005)<sup>28</sup>**

<sup>28</sup> Le **colostrum** est le nom donné au lait sécrété par les mammifères femelles en fin de gestation et dans les premiers jours (3 à 4) suivant la mise à bas. Il est très riche en protéines et anticorps indispensables à l'immunisation du nouveau-né.

Le modèle décrit jusqu'à présent représente un élevage laitier, c'est-à-dire sans contact entre les animaux. Cependant, même si le système laitier est majoritaire en France, il semble intéressant de voir si les contacts entre les veaux et leurs mères, durant leurs premiers mois de vie, peuvent influencer la progression du parasite. Nous savons, en particulier, que le système allaitant permet aux veaux d'être plus résistant aux attaques du parasite. Le lait qu'ils ingèrent leur permet d'augmenter significativement leurs défenses immunitaires et de résister plus efficacement à la cryptosporidiose.

Dans ce type d'élevage, à la naissance, le veau et la vache sont placés ensemble dans un box. Nous remarquons que les contacts entre le veau et la vache (essentiellement les tétées) vont varier en fonction de l'âge du veau. Le nombre de tétées d'un veau peut varier de 6 à 10 par jour le premier mois, et décroît jusqu'à devenir nul le neuvième mois (Lensink & Leruste, 2006). Nous considérons donc que ce nombre évolue linéairement pendant les neuf premiers mois et nous déterminons aléatoirement le nombre de tétées (Figure II.7). Les tétées se déroulent alors à heure fixe durant la journée et selon l'âge du veau qui est fixé par l'expérimentateur en début de simulation.

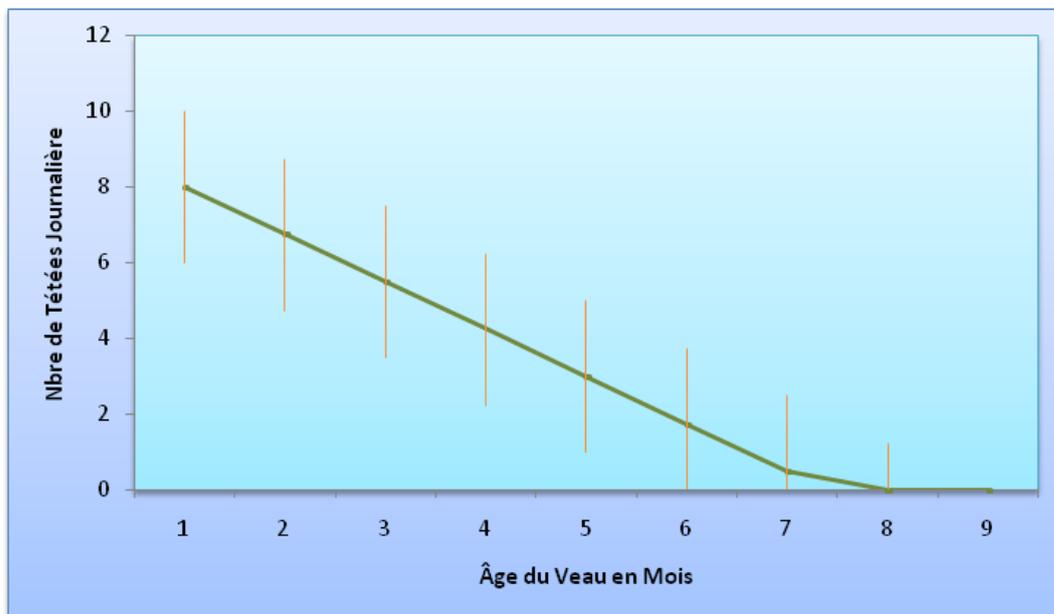


Figure II.7 : Evolution du Nombre de Tétées Journalières (Contact Vache / Veau)

Il est ensuite nécessaire de déterminer la quantité d’ocystes transmis ( $O_t$ ) à chaque tété. Les données recueillies nous permettent de dire que le nombre de parasites maximum estimé comme pouvant intervenir dans ce type de contact ( $O_{\text{atteignable}}$ ) est d’environ 100 ocystes. D’autre part, le nombre d’ocystes transmis est estimé en moyenne à 50% de cette valeur et peut être au minimum nul. Nous avons donc :

$$O_t = \text{Max} \left( 0, \text{Binomiale}(O_{\text{atteignable}}, 0, 5) \right)$$

Équation II.27

Cette quantité est ensuite absorbée par le bovin selon le processus d’ingestion défini au III.3.2 (Les Agents « Organe de Transformation »).

#### *V.1.4. Représentation Spatiale*

Le modèle que nous avons développé ne comprend pas de représentation explicite du mouvement des agents. En effet, étant donné le système que nous simulons (en l’occurrence une étable avec des boxes) il semble peu utile de rendre compte des déplacements des bovins. Quant au mouvement des mouches, il n’a pas de réel intérêt à être représenté non plus tant il est aléatoire.

Toutefois, nous pouvons imaginer que nous voulions étudier la circulation du parasite dans des conditions de pâturage, ou de fourragement des bovins. Il pourrait alors être intéressant de développer l’aspect visuel résultant du comportement des bovins. En effet, les bovins ont un comportement grégaire et également des intentions telles que celles de se nourrir ou de boire. Leurs déplacements est fonction des ressources que l’environnement peut offrir, de la perception visuelle ou olfactive que les bovins en ont ou encore de la mémoire qu’ils ont de cet environnement et de leurs préférences alimentaires. Leurs intentions peuvent également être orientées par le potentiel qu’ont certaines vaches du troupeau à mener les autres (Dumond & Hill, 2001; Dumont & Hill, 2003).

Une première représentation spatiale du mouvement des bovins dans de telles conditions a été envisagée et sa réalisation commencée.

Néanmoins, la somme des données et la difficulté pour les recueillir, nous ont paru trop importants par rapport aux objectifs que nous avons fixés. Afin de rester fixé sur les objectifs initiaux, nous avons décidé de laisser de côté pour le moment cet aspect de l'évolution du modèle.

Ce sujet apparaît donc aujourd'hui comme une perspective possible au projet actuel. Par la suite l'intégration d'une représentation des mouvements peut éventuellement ajouter un complément d'information par l'analyse visuelle du flux de parasites échangés.

## **V.2. L'Organisme des Bovins**

Lors de la présentation et de la validation de la première SOA mise en place, les experts du domaine ont soulevé la possibilité de faire évoluer le modèle selon notamment des aspects liés à l'évolution de l'organisme des agents. Nous avons introduit la notion d'état d'immunocompétence (EIC) dans notre modèle comme un attribut caractérisant l'aptitude des bovins à combattre la maladie. L'expérimentateur l'initialise pour chaque agent introduit à une valeur de son choix qui reste constante durant la simulation.

Cette représentation du système immunitaire est toutefois réductrice aux yeux des spécialistes. Nous avons donc envisagé deux modifications. La première consiste à faire évoluer le niveau d'EIC conjointement à la maladie ; c'est-à-dire que l'EIC ne reste plus constant mais change en fonction du nombre de parasites présents dans l'organisme des bovins. La seconde idée concerne les règles qui régissent l'état de santé des bovins dans la réalité et qui ne sont pas explicites car du à des aspects symptomatologiques ; ces règles se positionnent alors dans un environnement qui nécessite l'introduction de conditions et de données incertaines. Par conséquent, des règles floues permettraient l'évolution d'un niveau de santé en fonction de symptômes caractéristiques. A l'inverse, l'occurrence de certains événements symptomatiques se produisant durant la simulation pourraient être extraits.

Très peu de données sont présentes dans la littérature à ce sujet. Les experts ne font, à aucun moment, référence à des données précises concernant le système immunitaire des bovins. De plus, aucune corrélation n'est faite entre l'évolution d'une infection due à un parasite et l'évolution de l'état de santé de l'hôte ainsi que sur la manière de quantifier l'action de l'un sur l'autre.

De plus, en ce qui concerne les aspects liés à la symptomatologie, il semble que seule la diarrhée soit réellement caractéristique de la maladie. De plus, d'autres maladies sont responsables de symptômes difficilement différenciables de ceux observés lors d'une cryptosporidiose. Des analyses plus poussées sur les selles des animaux sont nécessaires pour avérer les cas de maladies dues à *Cryptosporidium*.

Un recensement des infections à *Cryptosporidium* et des symptômes associés a été mis en place par les biologistes en France afin de pouvoir mesurer l'étendue de la propagation du parasite. Nous avons par ailleurs effectué plusieurs tests, en collaboration avec l'Institut Pasteur, dans des élevages touchés par le parasite dans la région du Nord de la France ; pour le moment le nombre de ces cas est encore trop réduit pour être significatif et nous apporter des résultats probants.

### **V.3. Aspect Quantitatif du Modèle**

Les données sur lesquelles nous nous appuyons pour réaliser la modélisation sont, comme nous l'avons déjà souligné, issues en majorité d'études basées sur l'Homme. Il serait cependant intéressant d'évaluer l'évolution de la charge parasitaire réelle chez les bovins. En effet, nous avons abordé le fait que l'aspect qualitatif de la circulation du flux des oocystes est validé par les biologistes mais nous n'avons pas de données qui nous permettent d'affirmer que l'approche quantitative se trouve corrélée avec le système réel. Toutefois, des expérimentations sont en cours pour déterminer une partie des données qui ne sont pas disponibles actuellement dans la littérature. Elles pourront alors être facilement incorporées au système actuel et nous permettront alors de valider cet aspect de la modélisation de manière fiable.

## *VI. Synthèse : SOA et Gestion de Flux*

La simulation orientée agent que nous avons développée est appliquée au domaine particulier qu'est la biologie. D'une manière générale, l'étude que nous avons menée a la prétention d'apporter des réponses quant à une circulation particulière de flux dans un écosystème. D'autre part, nous retrouvons les caractéristiques des flux que nous avons modélisés dans bien des systèmes.

La simulation est utilisée dans divers domaines scientifiques ; la plupart du temps, elle est employée dans la représentation de systèmes complexes. Les champs d'application sont donc nombreux pour les SOA, en particulier dans les sciences sociales, politiques ou économiques, dans lesquelles les exemples de phénomènes émergents abondent et où de nombreux flux transitent. Nous citerons par exemple la modélisation des trafics (évacuation, trafic routier/aérien, gestion de flux de consommateurs, migration intra-urbaines), celle des marchés (la bourse, simulation stratégique), ou bien encore des entreprises (risque, organisation de la société). Les applications existent aussi dans des domaines plus différents comme en météorologie, en écologie (Cycle du Carbone, Contrôle et modélisation de ressources renouvelables (COMORE à l'INRIA)), ou même le sport (STAPS Marseille).

Que le projet se trouve dans n'importe quel domaine, la modélisation consiste à donner une représentation simplifiée (parce que non complète) d'un système, objet ou phénomène, afin d'essayer de reproduire son comportement en simulation. Le modèle permet de prédire certains comportements que le sujet modélisé pourrait adopter dans le cadre d'une simulation. Cette capacité prédictive, qualité indispensable d'une modélisation, peut avoir un caractère qualitatif ou quantitatif, selon que le modèle se contente de prévoir un certain comportement ou qu'il permette de prédire la valeur de telle ou telle grandeur mesurable. C'est précisément le but de la réalisation d'une SOA.

Les intérêts d'intégrer les techniques relatives aux SOA en tant que modèle informatique dédié à la simulation peuvent être résumés en trois points principaux :

- ↳ *Une SOA génère des phénomènes émergents* : Les phénomènes émergents résultent de l'interaction entre entités individuelles. Par définition, ils ne peuvent pas être réduits aux parties du système. Lorsque nous parlons de modélisation mathématique complexe, les modèles analytiques paraissent, à l'heure actuelle, plus fiables que ceux à base d'agents. Mais il faut considérer la modélisation à base d'agents comme un exemple de sciences expérimentales, et donc ne pas attendre la rigueur mathématique que peut avoir un modèle analytique. Ainsi les phénomènes d'émergence qui peuvent être observés à l'aide des modèles à base d'agents ne doivent pas être relégués à la fonction de démonstration de phénomènes mais doivent être considérés comme un apport important en termes d'outil d'expérimentation. L'émergence est un concept qui, s'il était décrit plus rigoureusement, pourrait justifier une utilisation plus générale des modèles à base d'agents, ce qui servirait grandement tous les domaines de la science qui utilisent ces modèles.
- ↳ *Une SOA fournit une description « naturelle » du système* : Elle sera particulièrement bien adaptée à la description d'un système (en l'occurrence un écosystème) du point de vue de l'activité de ses constituants, c'est-à-dire lorsque le comportement des individus n'est pas résumable à une transition globale, ou bien lorsque celui-ci est complexe (et donc difficile à décrire analytiquement) ou parfois irrationnel. De plus, la modélisation est plus facilement interprétable par un observateur humain, car la description par les concepts associés aux SMA est plus naturelle que par de simples processus ; la validation par un expert en sera donc facilitée, car il pourra facilement se rapporter au monde réel et à ses « macro-connaissances ». Elle facilite donc les relations entre thématicien, modélisateur et informaticien.
- ↳ *Une SOA est flexible* : tout d'abord au niveau du nombre d'agents et de leur description ; mais aussi, une dimension plus implicite de flexibilité est la capacité à modifier les niveaux de description et d'agrégation : nous pouvons facilement travailler avec des groupes d'agents, des sous-groupes, des agents isolés, avec différents niveaux de description coexistant dans un modèle donné.

Nous devons cependant reconnaître certaines limitations aux simulations orientées agents : bien que ce type de modélisation présente de grandes qualités, il existe assez peu d'applications industrielles, sans doute à cause de la nature particulière des variables et de la difficulté à mesurer les paramètres. La simulation sociale en milieu industriel n'a pas encore eu beaucoup de succès, car l'accent a été mis sur sa capacité prédictive plutôt que comme un moyen d'enseignement. Par exemple, il serait hasardeux d'affirmer pouvoir quantifier les bénéfices d'une entreprise à long terme avec un modèle multiagents ; cependant, il est possible de mieux comprendre la place d'une entreprise sur le marché en observant son évolution selon différentes configurations.

Une SOA doit présenter plusieurs caractéristiques essentielles parfois difficiles à réunir et qui rendent son utilisation délicate.

De fait, un modèle doit avoir un objectif précis, car un modèle avec un but trop général ne peut pas fonctionner. Il doit être construit au bon niveau de description, avec la quantité exacte de détails servant ce but, ce qui peut se révéler assez délicat.

D'autre part, les phénomènes modélisés impliquent souvent des agents pouvant avoir un comportement potentiellement irrationnel, des choix subjectifs, et une psychologie complexe – en d'autres mots, des facteurs difficiles à quantifier, calibrer, et même parfois difficiles à justifier. Cet aspect stochastique et l'évolution aléatoire relevant du concept d'émergence, nous contraignent à ne pas prendre de décision sur la base de la conclusion d'une seule simulation ; à cause de la variabilité des données d'entrée du modèle, la nature des sorties est similairement variable, et peuvent aller de ce qui relève d'intuitions purement qualitatives jusqu'à ce qui peut devenir des résultats quantitatifs utilisables pour la prise de décision.

Enfin, simuler le comportement de toutes les unités constituant un système multiagents peut être extrêmement gourmand en ressource informatique, et donc en temps. Bien que la puissance informatique augmente de plus en plus rapidement, les hauts besoins computationnels d'une SOA restent un problème lorsqu'il s'agit de modéliser de grands systèmes.

Toutes ces considérations nous montrent la difficulté de mettre en place une SOA qui corresponde aux besoins du problème auxquels elle est associée et qui réponde aux réelles attentes de l'expérimentateur. Cela met également en exergue le temps et la complexité d'analyse de ces simulations, qui sont parfois à la hauteur du système réel lui-même.

A la vue de ces différents objectifs, notre travail s'est orienté vers la conception d'un outil d'analyse plus poussé. Nous avons voulu développer un outil de niveau supérieur afin de faciliter l'exploration et la compréhension d'une Simulation Orientée Agent (SOA). L'évolution que nous proposons a pour but principal d'apporter un outil d'aide à la décision autonome réalisant la supervision du problème (Monitoring de SOA). Il s'agit de faire l'analyse du système afin d'acquérir de la connaissance sur son évolution. L'objectif est alors d'extraire les causes d'événements émergents en rétroagissant sur les données initiales de la simulation.

Par conséquent, ce système de monitoring englobe en quelques sortes le SMA de niveau inférieur afin de faire des hypothèses sur l'origine d'une propagation particulière de flux. La validation de ces hypothèses est effectuée et la réaction du modèle est ensuite testée afin d'évaluer la répercussion d'un changement de paramètres au début ou même au cours de la simulation et cela à plusieurs reprises. Ce méta-système interprète le comportement du système pour permettre de faire émerger les propriétés qui influent sur la propagation du parasite par l'auto-génération de scénarii et analyse les résultats à nouveau afin d'obtenir une résolution pyramidale du problème. C'est le sujet que nous développons au Chapitre III.

# Intercalaire Ch.II → Ch.III : De la Simulation à l'Aide à la Décision

---

La première partie de ce mémoire nous a montré l'intérêt d'utiliser la simulation dans la représentation de systèmes complexes. Cela nous a amené à exposer l'un des outils les plus adaptés à la modélisation dans ce contexte systémique : les SMA. Un grand nombre de concepts est associé à cette technique qui est développée autour de la notion principale d'émergence. Cette méthode, particulièrement adaptée à la modélisation d'écosystème, est souvent utilisée dans un contexte pluridisciplinaire, et permet aux thématiciens du domaine étudié d'observer l'évolution d'un système à des niveaux d'organisation multiples.

Nous avons mis en œuvre ces concepts dans la réalisation d'une SOA ayant trait au domaine de l'épidémiologie. En particulier, dans le Chapitre II, nous nous sommes penchés sur l'étude d'un parasite (*Cryptosporidium*) et des flux associés à sa circulation dans un écosystème semi-naturel. L'outil expérimental obtenu, forme de laboratoire virtuel, nous a permis d'éprouver le modèle selon différentes configurations des paramètres de simulation. Ainsi, au travers de scénarii, les tests effectués ont démontré la corrélation des simulations du modèle initial avec la réalité et ont également rempli un rôle explicatif et prédictif en nous permettant, avec les biologistes, d'émettre de nouvelles hypothèses sur la propagation du parasite.

Cependant, l'analyse des résultats peut vite devenir compliquée. De fait, plus les niveaux de détail et d'abstraction sont élevés, plus la simulation est fidèle à la réalité ; de cette façon, pour notre application, nous souhaitons trouver les réelles causes de la dissémination du parasite et proposer des actions pour l'enrayer. Paradoxalement, se développe alors un effet pervers : l'évolution de la SOA la rapproche du réel et son analyse tend à devenir aussi compliquée que celle du système que nous souhaitons modéliser. Dans le chapitre III, nous proposons une solution pour le monitoring de SOA ; l'objectif est d'apporter une première analyse du système, permettant d'évaluer l'importance de facteurs pouvant influencer son évolution en fonction de critères à optimiser. Ce méta-système fournit aux biologistes un outil d'aide à la décision autonome réalisant la résolution itérative d'une problématique par l'émergence de solutions.

---

<b>CHAPITRE I OUTILS POUR LA MODELISATION ET LA SIMULATION.....</b>	<b>27</b>
<b>CHAPITRE II GESTION DE FLUX PAR SYSTEMES MULTIAGENTS : APPLICATION EN EPIDEMIOLOGIE.....</b>	<b>86</b>
I. ECHANGES DANS LES SYSTEMES .....	86
II. LE PROBLEME EPIDEMIOLOGIQUE.....	91
III. MODELISATION DE LA CIRCULATION DE CRYPTOSPORIDIUM.....	112
IV. SIMULATION ET VALIDATION .....	136
V. EVOLUTIONS DU MODELE .....	147
VI. SYNTHESE : SOA ET GESTION DE FLUX.....	162
<b>CHAPITRE III MONITORING DE SIMULATION ORIENTEE AGENTS.....</b>	<b>167</b>
I. OPTIMISATION ET METAHEURISTIQUE .....	167
II. APPLICATION AU MONITORING DE SOA .....	181
III. RESULTATS.....	211
IV. CONCLUSION ET PERSPECTIVES .....	229

# Chapitre III Monitoring de Simulation Orientée Agents

## *I. Optimisation et Métaheuristique*

### **I.1. Des SOA...**

Face à un problème particulier, l'esprit humain agit selon une démarche précise, commune à chacun d'entre nous.

Placé dans une situation où il faut prendre une décision, un individu, consciemment ou non, imagine un certain nombre d'actions possibles, fait appel à la représentation qu'il possède de la situation (le modèle) et procède à des simulations, c'est-à-dire cherche à imaginer les conséquences des diverses actions possibles. Ces simulations achevées, il exécute, parmi les différentes actions possibles, celle dont les conséquences (obtenues par simulation) lui paraissent les plus favorables quant au but qu'il s'est fixé (Schneider, 1994).

Naturellement, il arrive que le résultat de l'action entreprise soit plus ou moins différent de ce qui est attendu. Cela signifie soit que le modèle que possède l'individu est plus ou moins incorrect, c'est-à-dire ne traduit pas bien la réalité, soit encore qu'une erreur a été commise dans l'évaluation des simulations, c'est-à-dire dans la suite de raisonnements ou d'informations utilisés dans un objectif précis et appliqués au modèle pour en déduire les conséquences de l'action. Dans les deux cas, l'écart constaté entre les prévisions et la réalité permet de corriger soit le modèle, soit les simulations (Schneider, 1994; Joubert & Hersent, 2005).

Cette démarche est naturelle, nous opérons tous, plus ou moins consciemment, de cette façon pour résoudre un problème.

Toutefois, dans le cas de systèmes complexes, comme les écosystèmes par exemple, nous avons montré qu'il est pratiquement impossible de synthétiser directement le modèle en question du fait du trop grand nombre de constituants inclus dans le problème et de leurs multiples interactions. Les limites de notre système cognitif montrent que, dans de telles situations, notre représentation et notre compréhension du système n'est pas immédiate et qu'une aide est nécessaire pour la prise de décision. Dans ce cas, notre premier réflexe est de chercher à reproduire cette démarche naturelle, presque innée, en utilisant des outils ou des méthodes plus puissants, nous permettant ainsi de la mettre en œuvre.

### *1.1.1. Notre Démarche Expérimentale*

Le terme de modèle, au sens où nous l'entendons aujourd'hui dans les sciences expérimentales, est d'un usage relativement récent bien que le concept soit aussi ancien qu'elles. En effet, pour étudier un phénomène plus complexe, nous commençons par faire des expérimentations en vue d'accumuler un certain nombre d'observations. À partir de ces observations, nous cherchons à imaginer un « mécanisme », « un modèle » qui « explique » le phénomène.

Un modèle ayant été « imaginé », il faut le « valider », c'est-à-dire vérifier par une « simulation » que, d'une part, nous retrouvons bien, par le modèle, les résultats des observations dont nous sommes partis pour l'imaginer, et que, d'autre part, le modèle permet de prédire avec une fiabilité donnée le résultat d'expériences non encore faites (rôle « prédictif » du modèle). Enfin, tout nouveau résultat expérimental, qui ne peut être prévu ou expliqué par le modèle, conduit à modifier celui-ci ou les simulations qui lui sont associées.

Nous voyons ainsi que les démarches de modélisation et de simulation sont indissolublement liées. Mais, alors que la modélisation s'inscrit toujours, par définition, dans une démarche de recherche d'une cause générale, d'un résultat global exprimant un ensemble fini d'observations, la simulation peut prendre, comme nous l'avons vu, des formes très différentes.

Jusqu'à une époque relativement récente, seuls les modèles mathématiques et analytiques étaient considérés comme de « vrais » modèles et il ne venait à l'esprit de personne d'appeler « simulation », la recherche des solutions d'un ensemble d'équations qui constituent le modèle. L'avènement des ordinateurs a contribué à donner un sens concret à la notion de modèle puisque nous pouvons « mettre un modèle sur ordinateur », le traitement du modèle par l'ordinateur (le fait de le faire évoluer selon des critères donnés) devenant, par définition, une simulation.

### *1.1.2. Les Méthodes Employées*

Les méthodes que nous utilisons vont plus loin encore. Elles conservent le principe de résolution que nous venons d'évoquer, ce cheminement logique, presque naturel dans sa démarche, mais à des niveaux de complexité supérieurs.

De fait, une SOA nous permet de faire émerger un comportement « intelligent » (i.e. dans le sens « organisé ») des interactions entre les agents et leur environnement. Ainsi, il est possible de reproduire un phénomène afin de tester des hypothèses susceptibles de l'expliquer ou/et de prévoir son évolution. Toute simulation se base sur une théorie préalable issue des connaissances du thématicien qui interviennent alors également lors de l'évaluation du modèle obtenu (Figure III.1).

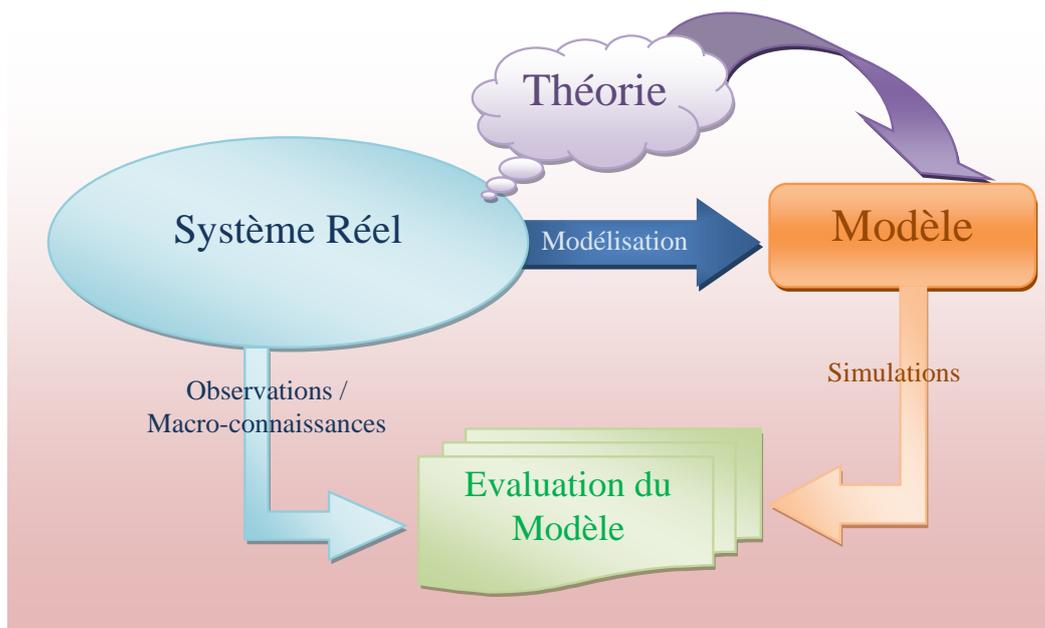


Figure III.1 : Démarche Expérimentale

Nous observons des similitudes de la démarche de la Figure III.1 avec celle du comportement humain face à un problème que nous avons vu au début de cette partie. Les SMA ont la particularité supplémentaire d'autoriser la représentation des comportements des entités prenant part à l'évolution du système et pas seulement leur résultat comme le feraient les méthodes analytiques. Cette démarche permet l'observation conjointe des niveaux micro et macro du système donnant le choix du niveau d'analyse ainsi que la possibilité de combiner plusieurs types d'expertise.

Par analogie avec la démarche que suit notre esprit, les connaissances du thématicien représentent « l'observation », le travail du modélisateur correspond, bien entendu, à la constitution du « modèle » et celui de l'informaticien répond à l'élaboration des « simulations ». La réalisation de l'outil d'expérimentation final s'articule alors autour de trois axes.

Tout d'abord, nous procédons à l'établissement du *modèle du domaine*, où le thématicien définit les concepts et les abstractions manipulées. En second lieu, le modélisateur, en relation avec le thématicien, se penche sur le *modèle de conception*. Ce dernier permet de déterminer, d'une part, les niveaux de granularité, d'abstraction et de détail convenant au problème posé par le thématicien, et, d'autre part, la décomposition de l'écosystème dans l'objectif de définir les entités et leurs relations au sein de notre modélisation en accord avec les contraintes technologiques imposées par l'informaticien. Vient ensuite le *modèle opérationnel* qui intervient de manière plus fonctionnelle sur des aspects comme la gestion du temps, des comportements ou encore de l'espace. Cependant, malgré l'aspect « technologique » de ce modèle, il est important que l'informaticien propose une représentation conviviale de son travail et reste ainsi en relation étroite avec le thématicien et le modélisateur afin de s'assurer que le modèle final corresponde bien aux besoins définis au départ.

Ainsi, les principes associés aux SMA offrent de nombreux intérêts. L'avantage majeur, mis en avant, est leur capacité à aborder et à représenter un problème d'une manière qui semble instinctive, c'est-à-dire qui rejoint celle que notre esprit adopte naturellement pour résoudre des problèmes courants.

De fait, la décomposition et la distribution, que la modélisation par des techniques à base de SMA nous obligent à opérer sur le système réel, permet la réalisation d'une abstraction, d'une part, probablement plus proche de la réalité et des connaissances du thématicien, et, d'autre part, bien plus intuitive, plus simple à mettre en œuvre que ce qui était proposé jusqu'à présent.

### *1.1.3. Les Limites*

Cette manière d'aborder la modélisation d'un système rend l'outil finalement obtenu à la fois plus flexible et plus robuste. Cela confère à cet outil une capacité d'adaptabilité importante. L'application des principes évoqués sous forme de SOA permet alors un large spectre de domaines auxquels ils peuvent apporter de nouvelles perspectives.

Néanmoins, ces techniques représentent encore actuellement un coût informatique élevé et le manque de support logiciel faisant l'unanimité auprès des chercheurs vient s'ajouter à ce premier inconvénient. Ces deux préoccupations arrivent derrière les difficultés de validation et la traçabilité faible que nous retrouvons dans les simulations réalisées et qui est souvent due à un manque d'explication des phénomènes émergents. En effet, la modélisation est souvent amenée à se complexifier dans le but d'apporter des réponses de plus en plus précises et détaillées sur le système réel ; ainsi, l'observation de l'évolution du système et du résultat des simulations devient parfois aussi complexe que ceux du système originel. Le cas de figure que nous avons soulevé au début de cette partie est alors à nouveau rencontré : les capacités cognitives de l'Homme sont trop restreintes pour évaluer de but en blanc le véritable impact que chaque élément constituant la simulation a sur le devenir final du système.

Nous nous apercevons que nous avons à nouveau besoin d'une aide extérieure pour trouver réponses à nos questions. Nous remarquons, en reprenant le début de cette partie, qu'il manque, dans notre approche de conception de système virtuel, une considération essentielle pour rejoindre exactement le raisonnement que notre esprit adopte naturellement face à des problèmes plus simples.

En effet, nous recréons le système (modèle), les entités présentes, leurs interactions, etc... Puis, afin de pouvoir observer son évolution, nous mettons en place un certain nombre de simulations.

Les cas étudiés devenant trop complexes, les connaissances des thématiciens ne sont plus suffisantes pour rétroagir de manière efficace et pour combler l'écart constaté entre les prévisions et la réalité. De fait, il serait long et fastidieux de mettre en place des expérimentations testant les multiples possibilités d'évolutions du modèle pour en choisir la meilleure. Quand bien même cette entreprise serait réalisée, il n'est pas évident que l'analyse des résultats désigne de manière non équivoque les réponses aux questions initiales ou même une démarche expérimentale qu'il serait possible d'adopter pour les trouver.

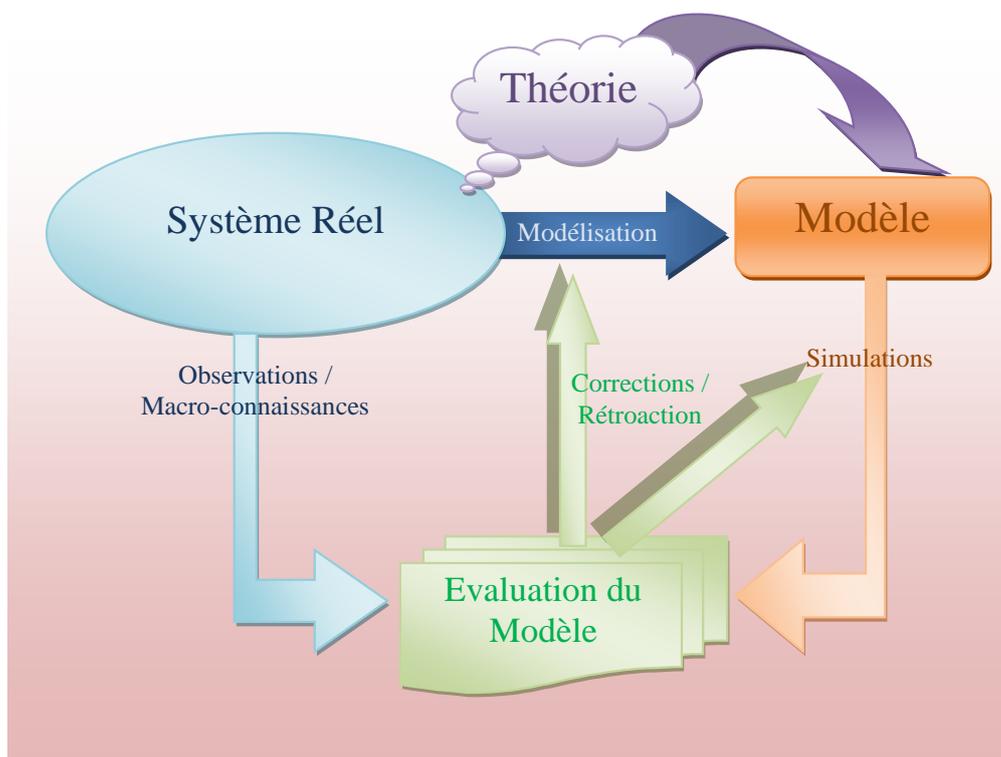


Figure III.2 : Rétroaction dans la Démarche Expérimentale

C'est sur ces constatations que nous basons notre travail dans le but d'automatiser la compensation des déviations des résultats obtenus par simulation. Afin d'isoler les causes d'un événement particulier, la rétroaction sur le système est nécessaire. La solution que nous proposons est de réaliser un correctif notamment par une réévaluation des données initiales et l'exploration des répercussions sur le devenir du système. Cette étape est capitale pour évaluer l'action à produire en amont sur le système pour assurer sa « bonne marche » ou obtenir un résultat spécifiquement souhaité et ainsi répondre aux interrogations des thématiciens.

Une analyse de la SOA par un méta-système automatisé autorise la formation d'hypothèses permettant d'asseoir une démarche expérimentale. Une SOA entre, par nature, dans le cadre des systèmes d'aide à la décision en se positionnant comme un laboratoire virtuel grâce auquel le thématicien peut étudier l'évolution des différents niveaux d'organisation du système dans un temps relativement court. Nous proposons d'apporter un degré d'autonomie supérieur dans cette approche d'aide à la décision en présentant dans la suite le principe de monitoring de SOA et en développant plus en détail la solution que nous proposons dans cette optique.

## **I.2. ... Vers l'Aide à la Décision**

### ***I.2.1. La Prise de Décision***

Optimisation et maximalisation sont les deux mots-clés définissant les théories de la prise de décision (Schneider, 1994; Joubert & Hersent, 2005). En effet, *prise de décision* veut dire qu'implicitement il y a un choix à effectuer, et généralement lorsque nous avons une attitude à adopter dans le choix d'une action à exécuter, elle est toujours employée dans le but d'optimiser la situation.

Nous en déduisons d'abord que la *décision* est le fait d'effectuer un choix lors de la confrontation à un problème afin de le résoudre ; puis, il en ressort également qu'une approche du concept de décision estime que la décision est un choix de type optimisateur.

Ainsi, dans un premier temps, le spécialiste du domaine détermine à quel problème il estime être confronté. Puis, une seconde phase consiste à répondre au problème précédemment formulé sachant qu'il est possible que les étapes nécessaires à la résolution du problème amènent le thématicien à reformuler son problème initial. Une fois la décision prise, un certain nombre d'effets vont se produire conditionnant alors les prochaines prises de décision.

Afin d'optimiser cette résolution, la *théorie de l'utilité* de Von Neumann-Morgenstern (Von Neumann & Morgenstern, 2004), habituellement utilisée en économie, préconise six principes pour prendre la meilleure décision :

- *Principe de l'ordonnance des alternatives* : Un preneur de décision doit être capable de comparer deux résultats d'une alternative et d'en préférer une à l'autre ou alors de ne pas tenir compte de cette alternative.
- *Principe de la dominance* : Un preneur de décision ne devra jamais choisir une stratégie de réponse dominée par une autre, c'est-à-dire dont l'ensemble des résultats comprend des résultats plus faibles ou égaux à ceux d'une autre stratégie. Il devra au contraire choisir la stratégie dominante.
- *Principe de l'annulation* : Si deux choix risqués entraînent des résultats dont certains sont identiques et de même probabilités alors l'utilité de ces résultats ne doit pas être prise en compte par le preneur de décision.
- *Principe de transitivité* : Si un preneur de décision préfère A à B et B à C alors il doit préférer A à C.
- *Principe de la continuité* : Un preneur de décision doit préférer une option risquée ayant un meilleur résultat, à un choix intermédiaire, plus sûr, pour autant que les chances de gagner soient suffisantes.
- *Principe de l'invariance* : Un preneur de décision ne doit pas être influencé par la manière dont les résultats et les propositions d'amélioration sont formulées.

Autrement dit, prendre une décision revient à avoir une démarche pragmatique régie par des règles déterminées. Nous pouvons, par conséquent, reproduire cette démarche de manière automatisée. Le problème d'optimisation consiste à trouver la *meilleure* solution dans un ensemble discret de solutions réalisables. En général, cet ensemble est fini mais compte un très grand nombre d'éléments, et il est décrit de manière implicite, c'est-à-dire par un ensemble de contraintes que doivent satisfaire les solutions réalisables.

### ***1.2.2. Recherche de la Meilleure Solution***

Pour définir la notion de *meilleure solution*, une fonction, dite *fonction objectif*, est introduite. Pour chaque solution, elle renvoie un résultat et la meilleure solution (ou *solution optimale* ou encore *optimum*) est celle qui minimise ou maximise la fonction objectif. Ce raisonnement induit clairement qu'un problème d'optimisation peut avoir plusieurs solutions optimales.

Trouver une solution optimale dans un ensemble discret et fini est un problème facile en théorie : il suffit d'essayer toutes les solutions, et de comparer leurs qualités pour voir se dégager la meilleure. Cependant, en pratique, l'énumération de toutes les solutions peut prendre trop de temps ; or, le temps de recherche de la solution optimale est un facteur très important, si ce n'est celui qui oblige à procéder à cette optimisation en utilisant des méthodes avancées. De plus, comme l'ensemble des solutions réalisables est défini de manière implicite, il est aussi parfois très difficile de trouver ne serait-ce qu'une solution optimale qui soit réalisable en cherchant une solution de manière aléatoire et sporadique.

Les outils d'aide à la décision permettent d'apporter des réponses pertinentes à des problématiques diverses mettant en œuvre plusieurs choix possibles, d'aider au diagnostic et, plus généralement, de faciliter la prise de décision stratégique ou opérationnelle en environnement imprécis et/ou incertain.

L'aide à la décision est alors souvent multicritère et constitue une branche d'étude de la *recherche opérationnelle*. Le but est d'imaginer des méthodes et des techniques rationnelles d'analyse et de synthèse des phénomènes d'organisation utilisables pour élaborer de meilleures décisions. Il s'agit de méthodes et de calculs permettant de choisir la solution optimale parmi tout un ensemble de solutions.

Notre objectif est ici de pratiquer l'extraction de connaissances valides et exploitables à partir d'un volume de données relativement important. Cela nécessite l'introduction de méthodes qui nous permettent ce traitement en vue de prendre une décision finale. Le méta-système obtenu doit permettre aux thématiciens d'utiliser de manière opérationnelle les résultats des analyses effectuées. Cela présuppose en général que nous nous fixions une hypothèse que les données vont nous permettre ou non de confirmer. Néanmoins, nous pouvons également adopter une démarche plus empirique consistant à faire émerger, à partir des données brutes, des hypothèses que l'expérimentateur peut ne pas soupçonner, et dont il aura à valider la pertinence.

Nous nous proposons alors d'utiliser un ensemble d'algorithmes pour construire des ensembles de données à partir de l'analyse des simulations, c'est-à-dire trouver des « schémas d'évolution intéressants » (*patterns*) selon des critères fixés au départ, et extraire de ces données un maximum de connaissances utiles aux thématiciens. Ce type d'algorithme s'apparente au concept de *métaheuristique*.

### ***1.2.3. Les Métaheuristiques***

Les *métaheuristiques* forment une famille d'algorithmes d'optimisation visant à résoudre des problèmes d'optimisation difficiles (souvent issus des domaines de la recherche opérationnelle, de l'ingénierie ou de l'intelligence artificielle) pour lesquels nous ne connaissons pas de méthode classique plus efficace (Dréo, Petrowski, Taillard, & Siarry, 2006; Glover & Kochenberger, 2003; Métaheuristique, 2007).

Les métaheuristiques sont généralement des algorithmes itératifs, qui progressent vers un optimum par échantillonnage d'une *fonction objectif*. Elles se comportent comme des algorithmes de recherche, tentant d'intégrer les caractéristiques d'un problème afin d'en trouver une approximation de la meilleure solution.

Il existe un grand nombre de métaheuristiques différentes, allant de la simple recherche locale à des algorithmes complexes de recherche globale. Ces méthodes utilisent cependant un haut niveau d'abstraction, leur permettant d'être adaptées à une large gamme de problèmes différents. Elles sont souvent inspirées par des systèmes naturels, qu'ils soient pris en physique, en biologie de l'évolution, ou encore en éthologie<sup>29</sup>.

#### I.2.3.a. Concepts Associés

Le but d'une métaheuristique est de résoudre un problème d'optimisation donné : elle cherche un objet mathématique minimisant (ou maximisant) une *fonction objectif*, qui décrit la qualité d'une *solution* au problème.

L'ensemble des solutions possibles forme *l'espace de recherche*. L'espace de recherche est au minimum borné, mais peut être également limité par un ensemble de *contraintes*.

Les métaheuristiques manipulent une ou plusieurs solutions, à la recherche de *l'optimum*. Les itérations successives doivent permettre de passer d'une solution de mauvaise qualité à la solution optimale ou quasi optimale. L'algorithme s'arrête après avoir atteint un *critère d'arrêt*, consistant généralement en l'atteinte du temps d'exécution imparti ou en une précision demandée.

Une solution ou un ensemble de solutions est parfois appelé un *état*, que la métaheuristique fait évoluer via des *transitions* ou des *mouvements*. Si une nouvelle solution est construite à partir d'une solution existante, elle est sa *voisine*. Le voisinage d'une solution est un sous-ensemble de solutions qu'il est possible d'atteindre par une série de transformations données. Par extension, l'ensemble des transformations considérées est parfois désigné par le terme « voisinage ».

---

<sup>29</sup> L'**éthologie** représente l'étude du comportement animal tel qu'il peut être observé en milieu naturel (signifie étymologiquement « *science des mœurs* »).

La *diversification* (ou exploration) désigne les processus visant à récolter de l'information sur le problème optimisé. L'*intensification* (ou exploitation) vise à utiliser l'information déjà récoltée pour définir et parcourir les zones intéressantes de l'espace de recherche. La *mémoire*, bien que représentant un aspect facultatif, est le support de l'apprentissage qui permet à l'algorithme de ne tenir compte que des zones où l'optimum global est susceptible de se trouver, évitant ainsi les optima locaux.

Les métaheuristiques progressent de façon itérative, en alternant des phases d'intensification, de diversification et éventuellement d'apprentissage, ou en mêlant ces notions de façon plus étroites. L'état de départ peut être choisi ou fixé aléatoirement, l'algorithme se déroulant ensuite jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit atteint.

Les notions d'intensification et de diversification sont prépondérantes dans la conception des métaheuristiques, qui doivent atteindre un équilibre délicat entre ces deux dynamiques de recherches. Les deux notions ne sont donc pas contradictoires, mais complémentaires.

Lorsqu'une solution est associée à une seule valeur, le problème est dit *mono-objectif*, lorsqu'elle est associée à plusieurs valeurs, le problème est alors qualifié de *multi-objectifs* (ou *multicritères*). Dans ce dernier cas, nous recherchons un ensemble de solutions *non dominées*, solutions parmi lesquelles nous ne pouvons décider si une solution est meilleure qu'une autre, aucune n'étant systématiquement inférieure aux autres sur tous les objectifs.

Dans certains cas, le but recherché est explicitement de trouver un ensemble d'optimums « satisfaisants ». L'algorithme doit alors trouver l'ensemble des solutions de bonne qualité, sans nécessairement se limiter au seul optimum (méthodes *multimodales*).

### 1.2.3.b. Vers le Monitoring de SOA

Les métaheuristiques ne nécessitent pas de connaissances particulières sur le problème optimisé pour fonctionner ; le fait de pouvoir associer une (ou plusieurs) valeurs à une solution est la seule information nécessaire.

Certaines métaheuristiques sont théoriquement « convergentes » sous certaines conditions. Il est alors garanti que l'optimum global sera trouvé en un temps fini, la probabilité de se faire augmentant asymptotiquement avec le temps. Cette garantie revient à considérer que l'algorithme se comporte, « au pire », comme une recherche aléatoire pure (la probabilité de tenter toutes les solutions tendant vers 1). Cependant, les conditions nécessaires sont rarement vérifiées dans le cadre d'applications réelles. En pratique, la principale condition de convergence est de considérer que l'algorithme est *ergodique* (qu'il peut atteindre n'importe quelle solution à chaque mouvement), mais la *quasi-ergodicité* est souvent suffisante (si la métaheuristique peut atteindre n'importe quelle solution en un nombre fini de mouvements).

Les métaheuristiques étant très généralistes, elles peuvent être adaptées à tout type de problème d'optimisation pouvant se réduire à une « boîte noire ». Elles sont souvent moins puissantes que des méthodes exactes sur certains types de problèmes. Elles ne garantissent pas non plus la découverte de l'optimum global en un temps fini. Cependant, comme nous l'avons déjà observé, un grand nombre de problèmes réels n'est pas représentable efficacement par des approches purement analytiques, les métaheuristiques peuvent alors être utilisées avec profit.

La notion d'efficacité se rapporte généralement à deux objectifs contradictoires : la vitesse et la précision. La vitesse est souvent mesurée en nombre d'évaluations de la fonction objectif, qui est généralement la partie la plus gourmande en temps de calcul. La précision se rapporte à la distance entre l'optimum trouvé par la métaheuristique et l'optimum réel, soit du point de vue de la solution, soit de celui de la valeur. Bien souvent, un algorithme rapide est peu précis, et inversement.

Généralement, un choix doit être fait quant au critère d'arrêt adéquat. Un nombre d'évaluations ou un temps imparti sont souvent utilisés, mais il est possible également de choisir d'atteindre une valeur donnée de la fonction objectif (le but étant alors de trouver une solution associée à cette valeur). Le choix de l'arrêt peut aussi être fait sur des critères dépendants du comportement de l'algorithme, comme une dispersion minimale de la population de points ou un paramètre interne approprié. En tout état de cause, le choix du critère d'arrêt influencera la qualité de l'optimisation.

L'utilisation de métaheuristiques peut paraître relativement simple, en première approche, mais il est souvent nécessaire d'adapter l'algorithme aux spécificités du problème à optimiser ne serait ce que par rapport au nombre et à la nature des facteurs à prendre en compte. Obtenir de bonnes performances passe généralement par une phase d'adaptation des diverses étapes de l'algorithme (initialisation notamment). En pratique, seul le savoir-faire et l'expérience de l'utilisateur permet de gérer ces problèmes.

C'est en ce sens que nous avons développé une méthode basée sur la recherche d'un optimum capable de réaliser le monitoring de SOA. A l'égard des concepts développés ci-dessus, cela signifie que, à la suite d'un certain nombre d'itérations, ce méta-système peut faire émerger et peut isoler des schémas d'organisation dans le SOA permettant de répondre à une problématique et de trouver les causes d'une propagation particulière de flux.

Dans la partie suivante, nous allons tout d'abord développer les méthodes de calcul que nous avons utilisées pour réaliser la rétroaction sur la SOA. Nous montrerons ensuite comment nous les avons adaptées à l'étude de la circulation du flux de *Cryptosporidium* afin de trouver les « meilleures actions » à effectuer dans une situation précise pour limiter la dissémination du parasite. Le méta-système réalise l'optimisation d'une fonction objectif selon des critères définis et par l'auto-génération de scénarii.

## II. Application au Monitoring de SOA

Nous avons choisi d'utiliser la méthode du *simplexe séquentiel* (Maros, 2002). Cette méthode itérative permet la recherche d'un optimum selon des critères définis. Nous énonçons également des règles permettant le déplacement du simplexe dans l'espace de recherche. Nous remarquerons que ces règles s'approchent fortement de celles énoncées dans la *théorie de l'utilité* de Von Neumann-Morgenstern (permettant de trouver la meilleure solution dans un processus de décision) que nous avons détaillée plus haut (§1.2.1).

Ensuite, nous montrons comment nous avons adapté cette méthode à la simulation orientée agents développée au Chapitre II.

### II.1. Méthode : Le Simplexe Séquentiel

La méthode du simplexe séquentiel utilise comme base une série de  $k+1$  points dans un espace à  $k$  dimensions. La figure formée est appelée *simplexe* et si tous les points sont équidistants, le simplexe est dit régulier.

Dans un espace à deux dimensions, un simplexe régulier est un triangle équilatéral, à trois dimensions c'est un tétraèdre régulier, à  $n$  dimensions c'est un hyperpolyèdre.

Les expériences sont effectuées dans les conditions expérimentales correspondant aux coordonnées des sommets du simplexe. A chaque point est donc associée une réponse mesurée «  $Y_i$  ».

L'idée générale consiste à supprimer le point pour lequel la réponse est jugée la plus « mauvaise » selon des critères expérimentaux définis et à le remplacer par un autre point situé à l'opposé de celui-ci sur l'axe passant par le centre de gravité des autres sommets.

Un nouveau simplexe est alors déterminé par le nouveau point (auquel une nouvelle expérience à réaliser est associée) et les  $k$  sommets conservés. La procédure est alors répétée le nombre de fois nécessaire à l'obtention des critères d'optimisation désirés.

La méthode procède par changements successifs de direction, chaque nouvelle mesure étant ajoutée aux précédentes, après l'élimination de la plus mauvaise.

Nous étudierons tout d'abord les différentes règles qui doivent être appliquées à un simplexe pour le faire évoluer suivant une direction favorable, puis nous verrons comment réaliser la construction du simplexe de départ.

### *II.1.1. Procédure de Déplacement*

#### II.1.1.a. Règles de Déplacement

Considérons tout d'abord le cas d'une réponse  $Y$ , fonction de deux variables  $X_1$  et  $X_2$  (cas de deux dimensions), et supposons que le simplexe régulier de départ, un triangle équilatéral, ait été choisi préalablement (Figure III.3). Sur les figures qui suivent, les courbes de niveaux sont tracées pour suivre l'évolution du simplexe et correspondent à l'évaluation de la progression de la réponse  $Y$  que nous souhaitons optimiser, la réponse de meilleure qualité étant représentée, de manière progressive, par des couleurs plus vives.

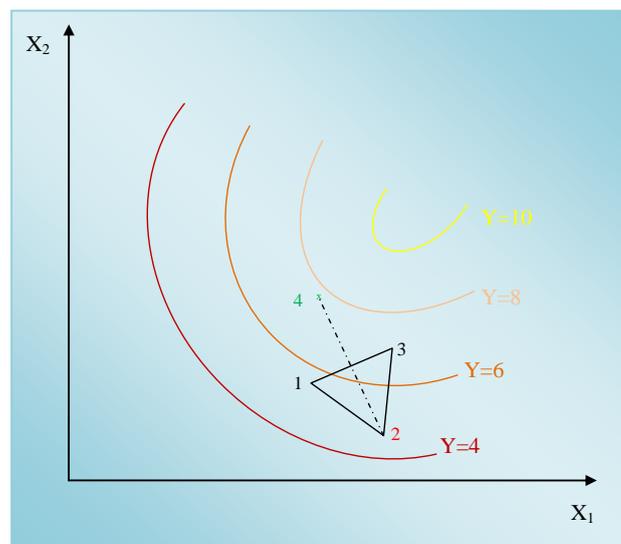


Figure III.3 : Déplacement du Simplexe : Simplexe de Départ

Les expériences, correspondantes aux conditions opératoires déduites des coordonnées des points (1), (2) et (3), sont effectuées. Les réponses mesurées sont  $Y_1$ ,  $Y_2$  et  $Y_3$ . En général, ces valeurs sont différentes et, d'après la Figure III.3 :

$$Y_2 < Y_1 < Y_3$$

La méthode d'optimisation consiste à se déplacer dans l'espace de recherche pour s'éloigner du plus mauvais point, dans l'objectif de trouver des réponses « meilleures ». Le point donnant la réponse  $Y_2$ , qui est ici la réponse de moins bonne qualité, est donc abandonné et une nouvelle expérience est effectuée au point (4), symétrique du point (2) par rapport à la droite (1)-(3). Associée au point (4), nous obtenons la réponse  $Y_4$ . Les points (1), (3) et (4) forment un nouveau simplexe, triangle équilatéral dans lequel :  $Y_1 < Y_3 < Y_4$

Nous appliquons alors, à ce nouveau simplexe, le même traitement. Le point (1), ayant la plus mauvaise réponse, est alors lui-même abandonné au profit de son symétrique (5) par rapport au côté (3)-(4) du simplexe. Cette procédure est appliquée successivement aux simplexes ainsi trouvés, et nous voyons dans la Figure III.4 que la direction du mouvement est toujours choisie à l'opposé du point le plus mauvais. Tout déplacement conduit ainsi implicitement à une région dans laquelle seront trouvées des valeurs de  $Y$  « meilleures » aussi longtemps que, dans le domaine limité par le triangle, la surface de réponse a une pente suffisante et est raisonnablement plane.

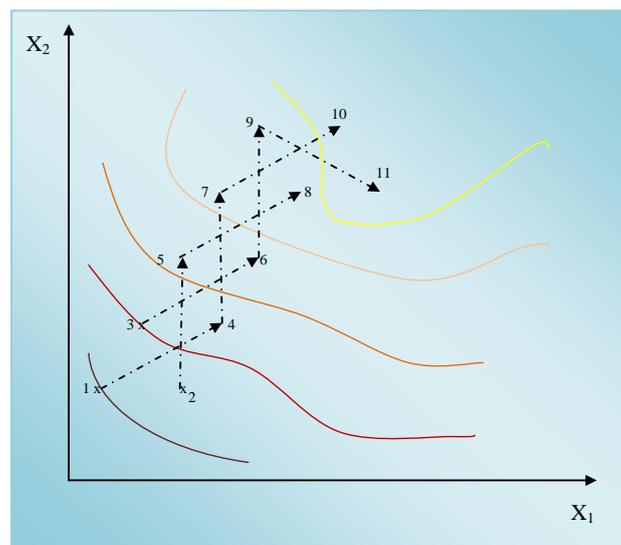


Figure III.4 : Déplacement du Simplexe : Règle I

En effet, il faut noter que le raisonnement suppose que la surface de réponse soit un plan de la forme :

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_k X_k$$

L'expression de cette surface contient  $k+1$  coefficients qui peuvent être déterminés de façon unique par les  $k+1$  réponses aux  $k+1$  sommets du simplexe.

Ce traitement conduit à des déplacements en zigzag, dans une direction grossièrement constante, et suivant approximativement la ligne de plus grande pente (Figure III.4).

Nous énoncerons donc la première règle de recherche de l'optimum, généralisée à  $k$  variables de la façon suivante :

**REGLE I** - *A partir du simplexe de départ, le point auquel la réponse est la moins bonne est abandonné et substitué par son symétrique par rapport au centre de gravité des  $k-1$  points restants, ce qui conserve la régularité du nouveau simplexe. Nous dirons que la transformation est une réflexion.*

Cette règle est appliquée de nouveau au simplexe trouvé, jusqu'à l'optimum, ou jusqu'à ce qu'apparaissent des exceptions problématiques qui justifient l'emploi d'autres règles.

Une difficulté peut, en effet, survenir si l'un des côtés du simplexe est situé sur une arête de la surface de réponse comme le montre la Figure III.5. L'application de la règle I conduit à supprimer le point A pour le remplacer par le point D où la réponse reste la plus mauvaise. En appliquant de nouveau la règle I, nous obtiendrions de nouveau A et la méthode du simplexe se résumerait à une oscillation continue ou *relaxation*. La règle II doit alors être utilisée.

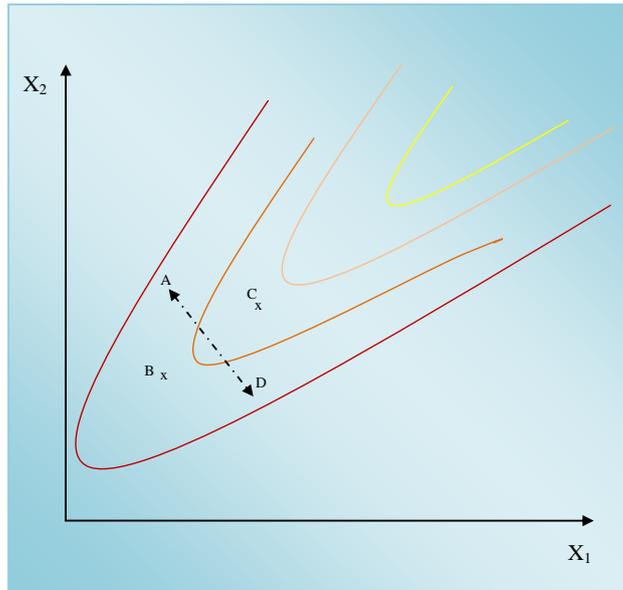


Figure III.5 : Déplacement du Simplexe : Cas Particulier de la Relaxation

**REGLE II** - Si l'application deux fois consécutives de la règle I conduit à retrouver le point précédemment abandonné, cette même règle I doit être appliquée au deuxième plus mauvais point du simplexe de départ.

Dans l'exemple de la Figure III.5, puisque l'image de A est A au bout de deux réflexions, nous considérons à nouveau le triangle ABC comme simplexe mais c'est le point B qui est alors abandonné (Figure III.6).

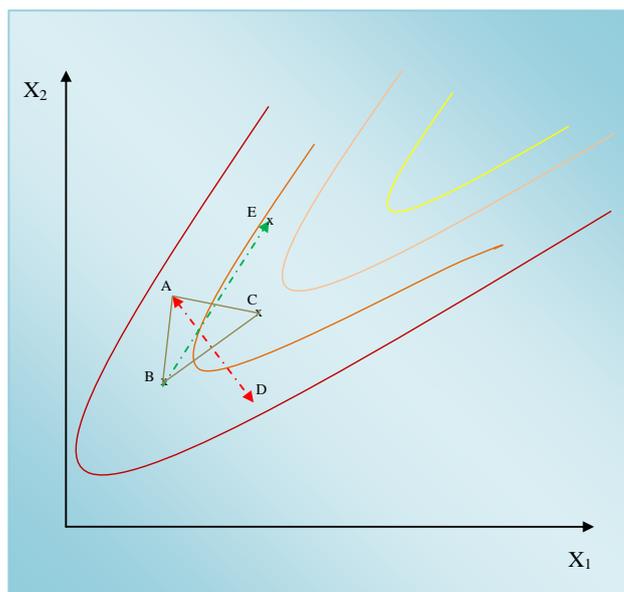


Figure III.6 : Déplacement du Simplexe : Règle II

Notons cependant que si la réponse en D est telle que :

$$Y_D < Y_B < Y_C \text{ et } Y_D > Y_A$$

Alors le simplexe BCD peut aussi être utilisé pour supprimer le point B (Figure III.7).

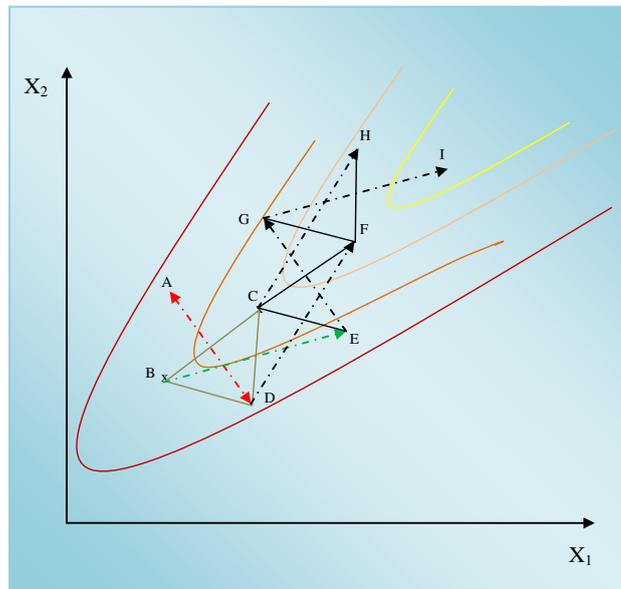


Figure III.7 : Déplacement du Simplexe : Application Alternative des Règles I et II

Il se peut aussi, pour deux raisons, que la réponse en un des points soit telle que le simplexe tourne autour de ce sommet :

- Le pivot est proche de l'optimum.
- La réponse en ce point est entachée d'une erreur importante.

La règle III doit être alors utilisée:

**REGLE III** - Si, après  $k+1$  réflexion, un même sommet est conservé dans les simplexes successifs, l'expérience en ce point doit être refaite.

Cette règle permet donc d'éviter la trop grande importance que pourrait prendre une réponse aberrante ou l'apparition d'un minima local.

Si la nouvelle expérience confirme le résultat précédent et que ce point garde une réponse  $Y$  quasiment identique, alors la progression du simplexe doit continuer par l'application de la règle suivante (Maros, 2002) :

**REGLE IV** - Il faut envisager un nouveau traitement lorsqu'un sommet du simplexe est utilisé depuis  $M$  itérations,  $M$  étant défini de façon empirique par la relation :

$$M = 1,65 k + 0,05 k^2 \text{ où } k \text{ représente le nombre de facteurs.}$$

Dans ce cas, la région de l'optimum a déjà été atteinte (Figure III.8). La règle I est utilisée jusqu'à l'obtention d'une oscillation où elle est alors remplacée par la règle II. Si la règle III confirme la réponse du point pivot alors l'optimum est dans l'un de ces simplexes et le pivot peut être considéré comme la position optimale qui puisse être obtenue sans réduire la taille du simplexe.

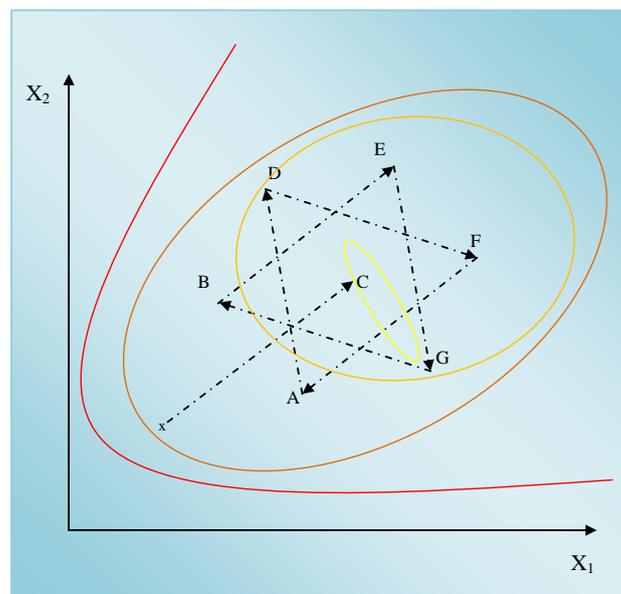


Figure III.8 : Déplacement du Simplexe : Règles IV

Plusieurs voies peuvent alors s'offrir :

- L'arrêt de la recherche si l'optimum trouvé est satisfaisant.
- La construction d'un plan d'expérience permettant l'étude du modèle au voisinage de l'optimum.
- L'application de la règle V exposée ci-dessous :

**REGLE V** - *Une recherche plus précise de l'optimum peut être conduite à partir du point stationnaire en diminuant la taille du simplexe (de la moitié ou du quart : cf. §II.1.1.a).*

L'application de toutes ces règles permettra probablement de trouver un optimum meilleur (sauf s'il a déjà été trouvé). Il faut remarquer que la méthode étudiée ici ignore totalement la forme réelle de la surface de réponse, mais sa rapidité permet de trouver en peu d'expériences la zone d'intérêt dont la réactivité peut être testée par de nouvelles simulations et une recherche plus fine.

Deux règles enfin peuvent être ajoutées. La première concerne les expériences où les erreurs de mesure peuvent gêner la progression du simplexe :

**REGLE VI** - *Si l'erreur expérimentale est trop grande par rapport à la variation supposée de la réponse, l'apparition d'une erreur de biais sera évitée en remplaçant toutes les anciennes observations du dernier simplexe par de nouvelles, chaque fois que  $2(k + 1)$  expériences auront été faites.*

Il peut aussi arriver qu'une ou plusieurs variables soient soumises à des contraintes en accord avec leur nature ou avec les objectifs de l'optimisation. Lorsque l'application de la règle I conduit à dépasser ces limites, la règle II peut être appliquée successivement au deuxième plus mauvais point, ou, au troisième si le deuxième dépasse lui aussi les limites, et ainsi de suite. Nous pouvons alors introduire la règle VII :

**REGLE VII** - Remplacer un nouveau sommet qui dépasse une contrainte par un autre sommet choisi par la règle II.

Il est également possible de borner les coordonnées des points en fonction des contraintes évoquées.

#### II.1.1.b. Calcul des Coordonnées

Prenons tout d'abord l'exemple de la Figure III.9 dans un espace à deux dimensions.

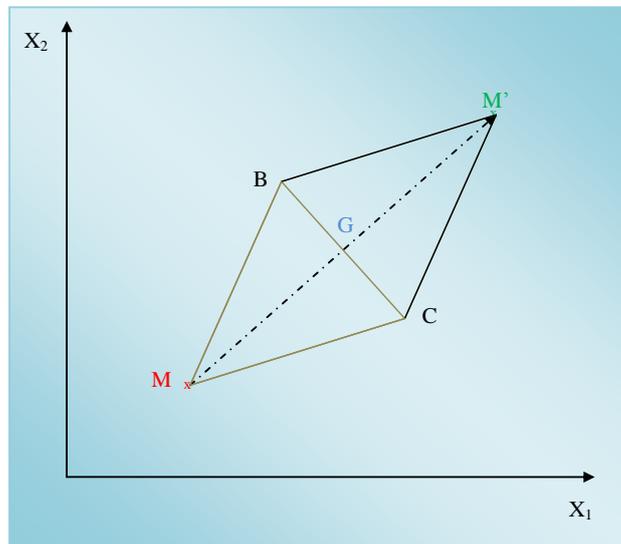


Figure III.9 : Déplacement du Simplexe : Espace à Deux Dimensions

M' est le symétrique de M par rapport à BC, donc G est à la fois le milieu de MM' et de BC. Appelons  $x_{iZ}$  la  $i^{\text{ème}}$  coordonnée d'un point Z. Nous pouvons écrire :

$$x_{iG} = \frac{(x_{iM} + x_{iM'})}{2} = \frac{(x_{iB} + x_{iC})}{2}$$

D'où :

$$x_{iM'} = \frac{2(x_{iB} + x_{iC})}{2} - x_{iM}$$

Équation III.1

Dans la Figure III.10, à trois dimensions, le point M a pour symétrique le point M' par rapport au plan BCD (donc par rapport au centre de gravité G de ce plan).

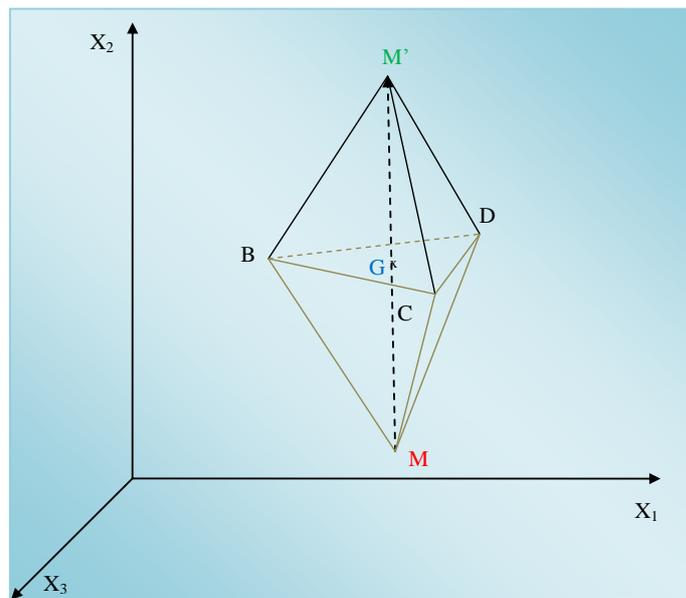


Figure III.10 : Déplacement du Simplexe : Espace à Trois Dimensions

De la même façon, nous pouvons écrire :

$$(x_{iG} - x_{iB}) + (x_{iG} - x_{iC}) + (x_{iG} - x_{iD}) = 0$$

D'où :

$$x_{iG} = \frac{(x_{iB} + x_{iC} + x_{iD})}{3}$$

De plus :

$$x_{iG} = \frac{(x_{iM} + x_{iM'})}{2}$$

Nous en déduisons que :

$$x_{iM'} = \frac{2}{3}(x_{iB} + x_{iC} + x_{iD}) - x_{iM}$$

Équation III.2

De façon générale, en posant  $\mathbf{GM}' = \mathbf{Y}_r \overline{\mathbf{MG}}$  et  $\mathbf{Y}_r = \mathbf{1}$  nous obtenons le point M' symétrique de M par rapport à G. Nous verrons plus loin l'utilisation du coefficient  $\mathbf{Y}_r$  dit *coefficient de réflexion*.

Nous avons alors :

$$x_{iM'} - x_{iG} = \mathbf{Y}_r (x_{iG} - x_{iM})$$

D'où :

$$x_{iM'} = (\mathbf{1} + \mathbf{Y}_r)x_{iG} - \mathbf{Y}_r x_{iM}$$

Équation III.3

Avec, Z désignant l'un des k+1 sommets du simplexe :

$$x_{iG} = \frac{1}{k} \sum_{\substack{1 \leq Z \leq k+1 \\ (Z \neq M)}} x_{iZ}$$

Équation III.4

En introduisant l'Équation III.4 à l'Équation III.3, nous obtenons successivement :

$$x_{iM'} = \frac{1 + \mathbf{Y}_r}{k} \sum_{1 \leq Z \leq k+1} (x_{iZ} - x_{iM}) \quad (Z \neq M)$$

Équation III.5

$$x_{iM'} = \frac{1 + \mathbf{Y}_r}{k} \sum_{1 \leq Z \leq k+1} \left( x_{iZ} - \left( \frac{1 + \mathbf{Y}_r}{k} + \mathbf{1} \right) x_{iM} \right)$$

Équation III.6

Qui se réduit, en posant  $Y_r = 1$ , à :

$$x_{iM'} = \frac{2}{k} \sum_{1 \leq Z \leq k+1} \left( x_{iZ} - \left( \frac{2}{k} + 1 \right) x_{iM} \right)$$

Équation III.7

Les Équation III.5, Équation III.6 et Équation III.7 permettent donc de calculer simplement les coordonnées d'un nouveau point en fonction de celles de tous les sommets du simplexe.

#### II.1.1.a. Optimisation de la Recherche de l'Optimum

La méthode du simplexe peut être utilisée pour la recherche de l'optimum d'une surface de réponse mais également pour la recherche de l'extrémum d'une fonction objectif (maximum ou minimum). Nous développons dans la suite les différentes méthodes utilisées pour rendre la recherche d'un optimum, par le simplexe, la plus efficace possible. Les règles d'utilisation énoncées ci-dessus restent inchangées.

L'optimisation repose en premier lieu sur la valeur de la constante  $Y_r$  (Équation III.3). Ce coefficient est positif et déterminé par l'utilisateur. Comme nous l'avons vu, si  $Y_r$  est égal à l'unité, la réflexion est une symétrie.

Cependant, il est possible de choisir  $Y_r$  comme étant différent de 1. Dans ce cas, si  $Y_r < 1$ , le simplexe obtenu n'est plus régulier et sa taille diminue peu à peu comme le montre la Figure III.11. A l'inverse, si  $Y_r > 1$ , sa taille augmente alors progressivement (Figure III.12).

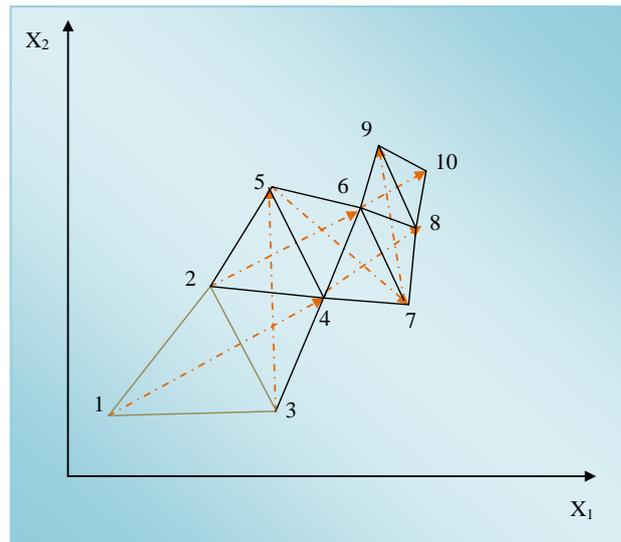


Figure III.11 : Optimisation du Déplacement du Simplexe

Prenons le cas de la recherche d'un maximum. Si  $(I)_Z$  est la valeur de la fonction objectif à un point Z,  $(I)_{M'}$  peut donc être calculée. Notons par  $(I)_I$  la plus petite valeur de  $(I)$  dans le nouveau simplexe et  $(I)_S$  la plus grande valeur.

Trois cas peuvent se présenter :

$$\Rightarrow (I)_I < (I)_{M'} < (I)_S$$

Le point  $M'$ , symétrique de M, est alors conservé dans le nouveau simplexe (Figure III.9)

$$\Rightarrow (I)_{M'} > (I)_S$$

Dans ce cas, la direction dans laquelle le simplexe se déplace est la bonne : le point  $M'$  s'approche du maximum. La recherche est poursuivie et amplifiée dans cette direction : nous réalisons une *dilatation* (Figure III.12).

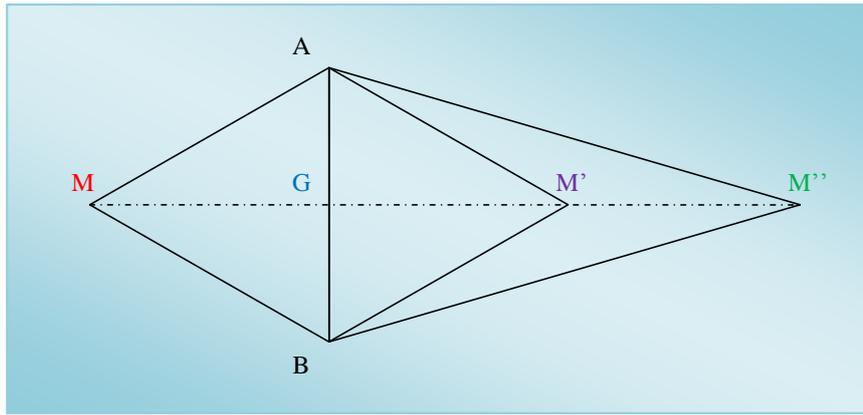


Figure III.12 : Optimisation du Déplacement du Simplexe : Dilatation

Le point  $M''$  est défini de la façon suivante :

$$\overline{GM''} = \Upsilon_d \overline{GM'} \text{ avec } \Upsilon_d > 1$$

Équation III.8

$\Upsilon_d$  représente le *coefficient de dilatation* ( $\Upsilon_d$  est en général choisi égal à 2).

$$(x_{iM''} - x_{iG}) = \Upsilon_d (x_{iM'} - x_{iG})$$

$$x_{iM''} = \Upsilon_d x_{iM'} + (1 - \Upsilon_d) x_{iG}$$

Équation III.9

L'Équation III.9 peut elle-même être exprimée en fonction de  $x_{iZ}$  en remplaçant  $x_{iM'}$  par l'Équation III.5, l'Équation III.6 ou l'Équation III.7 et  $x_{iG}$  par l'Équation III.4

Si la valeur calculée  $(I)_{M''}$  est supérieure à  $(I)_S$ , le point  $M''$  remplace le point  $M'$  dans le simplexe. Si  $(I)_{M''} < (I)_S$ , la dilatation ne donne pas de bons résultats et  $M'$  est conservé.

$$\hookrightarrow (I)_{M'} < (I)_I$$

La direction trouvée dans laquelle le simplexe se déplace est mauvaise : le point  $M'$  s'éloigne du maximum. Nous réalisons une *contraction* (Figure III.13).

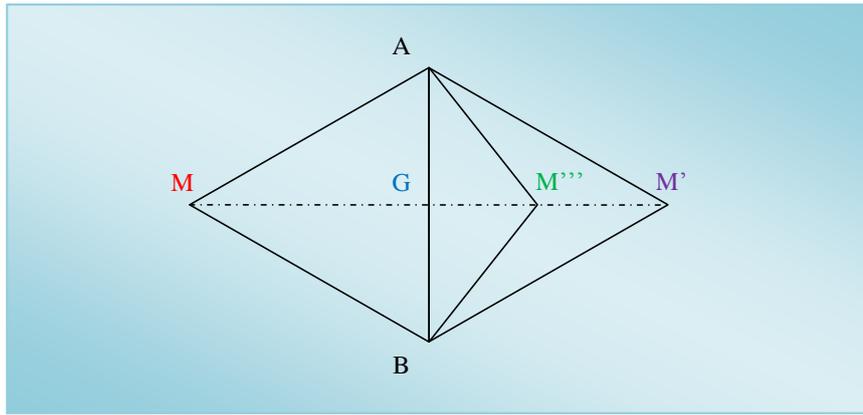


Figure III.13 : Optimisation du Déplacement du Simplexe : Contraction

Le point  $M'''$  est défini de la façon suivante :

$$\overline{GM'''} = \Upsilon_c \overline{GM'}$$
 avec  $\Upsilon_c > 1$

Équation III.10

$\Upsilon_c$  représente le *coefficient de contraction* ( $\Upsilon_c$  est en général choisi égal à  $\frac{1}{2}$ ).

L'Équation III.9 devient :

$$x_{iM'''} = \Upsilon_c x_{iM'} + (1 - \Upsilon_c) x_{iG}$$

Équation III.11

Si  $(I)_{M'''} < (I)_{M'}$ , alors tous les  $x_{iZ}$  ( $\forall Z \neq S$ ) sont remplacés par  $\frac{(x_{iZ} - x_{iS})}{2}$ .

Si  $(I)_{M'''} > (I)_{M'}$ , alors le point  $M'''$  remplace le point  $M'$  dans le simplexe.

### II.1.2. Détermination du Simplexe de Départ

Il est possible d'établir plusieurs simplexes de départ pouvant s'exprimer simplement. Nous donnons ci-dessous les trois modèles les plus utilisés.

### II.1.2.a. Simplexe de Départ Numéro 1

Dans le cas d'un simplexe à deux dimensions (Figure III.14), ce simplexe est représenté par le triangle (si la dimension est supérieure à 2, nous parlerons de polyèdre) dont un sommet est situé à l'origine des axes, et dont l'axe passant par ce sommet et le centre de gravité sont confondus avec la première bissectrice. L'origine des axes  $X'_1$  et  $X'_2$  représente le point correspondant au moins bon résultat supposé avant l'établissement du simplexe.

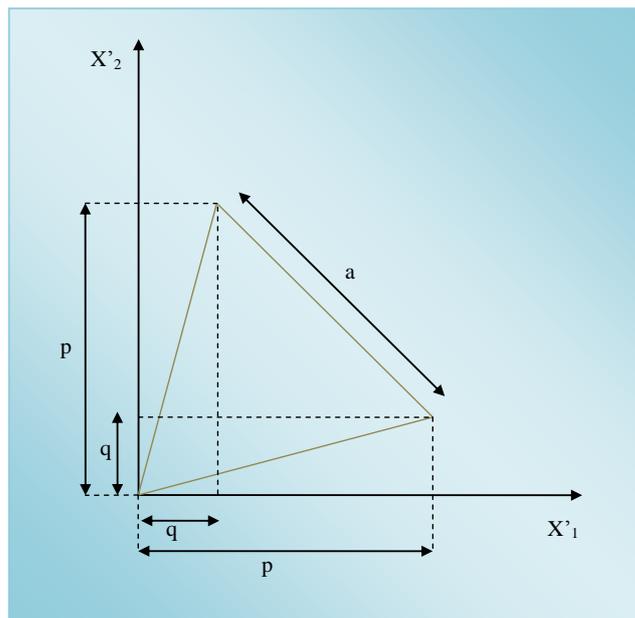


Figure III.14 : Simplexe de Départ Numéro 1

Le simplexe est choisi dans n'importe quel cadran, le signe de  $p$  et de  $q$  dépendent du cadran choisi.

Le Tableau III.1 indique la matrice d'expérience des  $k+1$  points du simplexe, où  $k$  représente le nombre de facteurs sur lesquels repose l'analyse (i.e. le nombre de dimensions).

Point	Facteur					
	1	2	3		k-1	k
1	0	0	0	.....	0	0
2	p	q	q	.....	q	q
3	q	p	q	.....	q	q
.	.	.	.		.	.
.	.	.	.		.	.
.	.	.	.		.	.
k	q	q	q	.....	p	q
K+1	q	q	q	.....	q	p

Tableau III.1 : Matrice d'Expérience du Simplexe de Départ n°1

Cette matrice est formée d'une ligne de zéros, puis d'un tableau symétrique ne contenant que  $p$  sur la diagonale principale et  $q$  en dehors de la diagonale. La partie mise en évidence dans le Tableau III.1, représente l'exemple de la Figure III.14 du simplexe à deux dimensions.

Les valeurs de  $p$  et  $q$  sont déterminées en exprimant le carré de la distance entre deux points du simplexe qui est constant et égal à  $a^2$ . Nous exprimons donc :

↳ Le carré de la distance entre le point 1 et le point  $j$  est :

$$(p - 0)^2 + (k - 1)(q - 0)^2 = a^2$$

⇔

$$p^2 + (k - 1)q^2 = a^2$$

Équation III.12

↳ Le carré de la distance entre deux points  $i$  et  $j$  ( $i \neq j$ ,  $i \neq 1$ ,  $j \neq 1$ ) :

$$(p - q)^2 + (q - p)^2 + (k - 2)(q - q)^2 = a^2$$

⇔

$$2(p - q)^2 = a^2$$

Équation III.13

En résolvant Équation III.12 et Équation III.13, nous trouvons :

$$p = \frac{a}{k\sqrt{2}}(k - 1 + \sqrt{k + 1})$$

$$q = \frac{a}{k\sqrt{2}}(\sqrt{k + 1} - 1)$$

Équation III.14

Nous pouvons maintenant déterminer  $p$  et  $q$  en fonction du nombre de facteurs  $k$  choisi et de la valeur de  $a$  qui peut être prise arbitrairement.

### II.1.2.b. Simplexe de Départ Numéro 2

Pour ce simplexe de départ, nous posons comme centre du plan d'expérience le point correspondant au meilleur résultat obtenu et nous construisons le simplexe autour de ce point. Nous avons présenté le simplexe à deux dimensions dans la Figure III.15 ci-dessous :

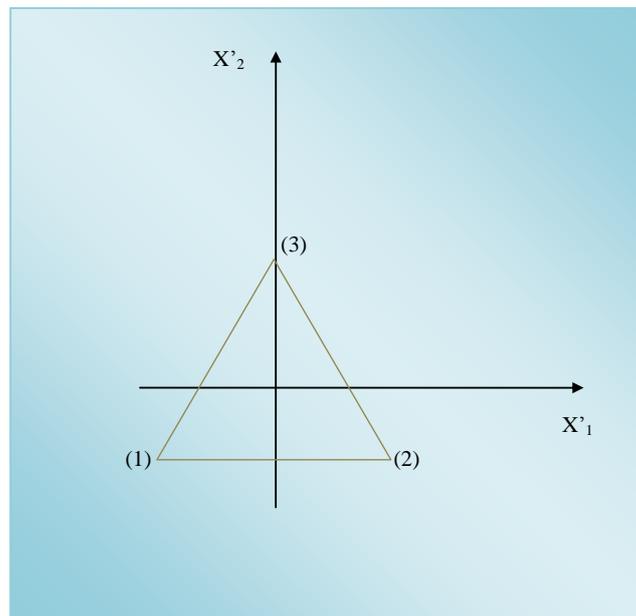


Figure III.15 : Simplexe de Départ Numéro 2

Nous donnons dans le Tableau III.2 ci-dessous la matrice d'expérience générale.

Point	Facteur					
	1	2	3	4	.....	k
1	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2\sqrt{3}}$	$-\frac{1}{2\sqrt{6}}$	$-\frac{1}{2\sqrt{10}}$	.....	$-\frac{1}{\sqrt{2k(k+1)}}$
2	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2\sqrt{3}}$	$-\frac{1}{2\sqrt{6}}$	$-\frac{1}{2\sqrt{10}}$	.....	$-\frac{1}{\sqrt{2k(k+1)}}$
3	0	$\frac{2}{\sqrt{3}}$	$-\frac{1}{2\sqrt{6}}$	$-\frac{1}{2\sqrt{10}}$	.....	$-\frac{1}{\sqrt{2k(k+1)}}$
4	0	0	$\frac{3}{\sqrt{6}}$	$-\frac{1}{2\sqrt{10}}$	.....	$-\frac{1}{\sqrt{2k(k+1)}}$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
K+1	0	0	0	0	.....	$-\frac{k}{\sqrt{2k(k+1)}}$

Tableau III.2 : Matrice d'Expérience du Simplexe de Départ n°2

### II.1.2.c. Simplexe de Départ Numéro 3

Dans cette construction nous orientons le simplexe de telle façon que l'un des côté de celui-ci soit parallèle à l'axe du facteur qui semble intuitivement le plus important (Figure III.16).

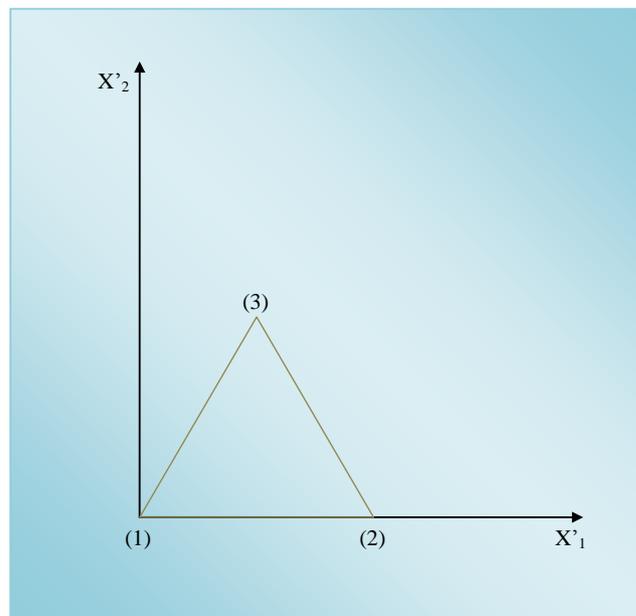


Figure III.16 : Simplexe de Départ Numéro 3

Cette construction n'est donc valable que si nous avons déjà une idée de l'influence des différents facteurs étudiés.

#### II.1.2.d. Comparaison des Trois Simplexes

Il est difficile de comparer l'efficacité des trois simplexes de départ. Notons cependant leurs principales caractéristiques.

Dans le 1er simplexe, les variations de chaque facteur sont identiques et la connaissance de la direction optimale permet au départ une orientation efficace.

Dans le 2ème simplexe, aucune orientation n'est privilégiée.

Dans le 3ème simplexe, nous constatons que nous tenons compte de l'influence prépondérante d'un facteur. Remarquons également qu'il est facile dans cette construction d'ajouter ou de supprimer un facteur.

## **II.2. Application au Modèle Epidémiologique**

### ***II.2.1. Situation***

Nous proposons une solution de monitoring de SOA basée sur le principe du simplexe séquentiel. La conception d'un méta-système à partir de cette technique permet de mettre en place la résolution itérative d'un problème en fonction de contraintes prédéfinies. Ce problème doit être exprimé sous la forme d'une fonction objectif dont le résultat correspond à l'évaluation de la pertinence de la solution. Ainsi, à chaque itération, la métaheuristique est capable de proposer une solution faisant partie de l'espace de recherche. En fonction de la vitesse et de la précision souhaitées, il est alors possible de définir un critère d'arrêt de l'algorithme à partir duquel la qualité de la solution devient acceptable.

La Figure III.17 reprend chaque étape de cette démarche de monitoring de simulation orientée agents. Nous nommons *expérience*, le cycle obtenu à chaque rétroaction sur le système pratiquée par le méta-système, en opposition à *simulation* qui désigne chaque processus d'évolution répété de la SOA permettant l'évaluation de la qualité de la solution.

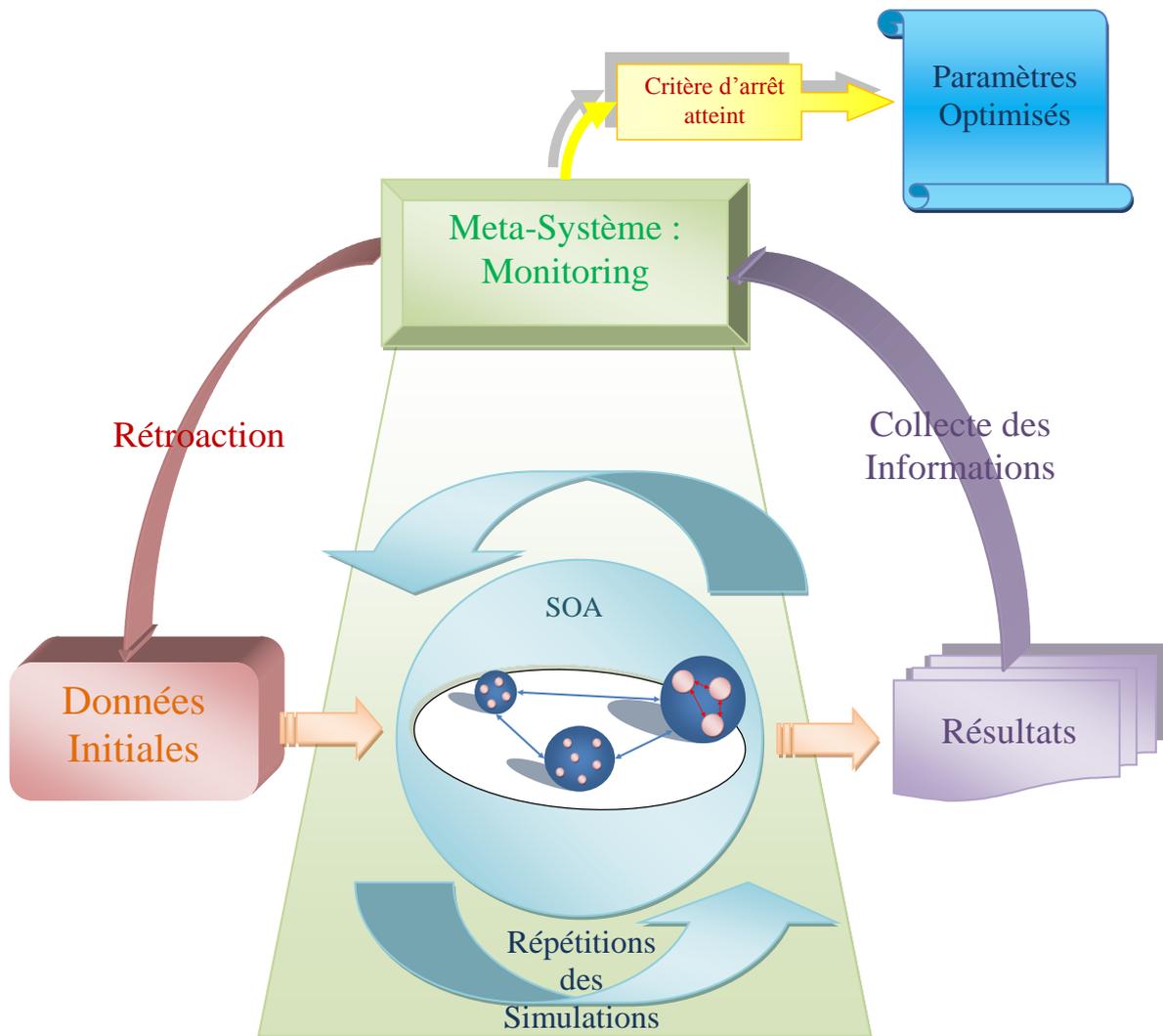


Figure III.17 : Démarche pour le Monitoring de SOA

La Figure III.17 montre la démarche adoptée pour réaliser l'optimisation du système afin d'obtenir une évolution faisant émerger un état final satisfaisant. Cela signifie qu'au fur et à mesure des expériences, l'évolution du système doit être évaluée, pour, finalement, permettre de trouver les critères les mieux adaptés, correspondant à l'évolution du système la plus proche de celle souhaitée, et qui réponde de la manière la plus précise possible à la question initiale.

Ce type de technique apporte l'avantage de n'être bornée ni au nombre, ni par le type de facteurs intervenant dans l'évaluation. De plus, la fonction objectif peut être définie par une équation regroupant un ensemble de critères ayant une pondération plus ou moins importante dans le résultat et donc dans l'évaluation du système. Ainsi, ces principes peuvent être adaptés à des domaines, à des systèmes ou encore à des problèmes complètement hétérogènes.

Dans le cas de l'étude de la circulation de *Cryptosporidium*, plus précisément du flux de parasites dans un écosystème semi-naturel que nous avons modélisé, nous avons choisi de baser notre analyse sur trois critères. Nous souhaitons mesurer l'importance qu'ont le nombre de mouches, la fréquence des nettoyages et la contamination de l'eau. Nous cherchons alors à minimiser le nombre de parasites présents en moyenne chez les bovins.

De plus, nous avons choisi d'utiliser la SOA sans les évolutions développés au Chapitre II §V. D'une part, ces évolutions n'ont pu être validées dans leur intégralité, et, d'autre part, nous voulons décrire notre système par un cas simple et intuitif afin d'attester sa validité. En effet, il semble, à priori, que plus la contamination de l'eau est importante, plus les bovins sont susceptibles d'être infectés et de porter une quantité importante de parasites. Le raisonnement est tout aussi perceptible en ce qui concerne le nombre de mouches présentes dans l'étable et la fréquence de nettoyage, bien que la corrélation entre ces facteurs et l'apparition d'une pandémie reste encore formellement à établir.

Notre objectif n'est pas directement ici d'apporter des réponses supplémentaires à celles déjà apportées aux biologistes. Tout d'abord, nous voulons conforter les résultats obtenus lors de l'analyse du comportement de la SOA étudiée au Chapitre II, mais, plus généralement, nous souhaitons créer un outil d'aide à la décision doté d'une réelle autonomie. Cet outil doit être capable d'apporter des réponses fonctionnelles et adaptées à l'expérimentateur dans un cadre précis d'étude. Une fois ce fait établi, il est possible d'émettre des perspectives sur les capacités du méta-système à induire l'établissement d'hypothèses plus élaborées car son adaptabilité nous permettra, à l'avenir, de tester son efficacité sur des systèmes plus complexes.

## *II.2.2. Réalisation*

### II.2.2.a. Choix des Facteurs à Optimiser

Trois facteurs interviennent, selon nous, de manière significative, dans la dissémination du parasite. Nous souhaitons évaluer leur réelle influence.

Tout d'abord, la contamination de l'eau, exprimée en parasite(s) par litre dans notre modèle, joue, selon toute vraisemblance, un rôle prépondérant. De fait, nous avons vu que l'eau est l'un des vecteurs principaux du parasite. Son influence est donc importante sur l'état du système et en particulier sur l'émergence d'une pandémie. Bien que ce critère représente une contrainte dont l'impact est cernable, nous aimerions évaluer le poids réel qu'il représente en fonction des autres critères. D'autre part, son introduction constitue, en quelque sorte, l'incorporation d'un facteur témoin.

Le nombre de mouches présentes dans l'étable définit un second facteur pris en compte dans le monitoring que nous opérons. Nous avons mis en évidence dans le Chapitre II que la mouche, comme l'eau, se positionne aussi en tant que vecteur du parasite. Nous avons également souligné le fait que les diptères avaient un rôle de transporteur passif dans la dissémination du parasite. Ce dernier ne se développe donc pas dans l'organisme des insectes. La mouche, bien que pouvant être responsable de la contamination des animaux, ne transmet aux bovins qu'une quantité peu influente d'oocystes par rapport au nombre total s'y développant. En introduisant ce critère dans l'optimisation, nous souhaitons déterminer jusqu'à quel point la présence des diptères influe sur l'apparition d'une pandémie et si une action sur ce facteur a une influence significative sur le devenir du système.

Le troisième et dernier facteur contribuant au monitoring, correspond à la fréquence de nettoyage dans l'étable. Cette fréquence est exprimée en nombre de jours (i.e. « tous les X jours ») ou en nombre de fois par jour (i.e. fréquence supérieure à une fois par jour). Nous avons introduit ce facteur car nous recensons très peu de données établissant un rapport entre la propreté de l'étable et l'évolution de la maladie en son sein.

Or, les parasites se retrouvant en quantité non négligeable dans les déjections des animaux, les conditions d'hygiène peuvent s'avérer substantielles dans l'établissement d'une épidémie. Etant donné les grandes disparités existantes dans ce domaine en fonction des types d'exploitation et des conditions d'élevage, il nous a semblé intéressant d'évaluer l'impact de ce critère sur l'état du système.

Le méta-système réalisé permet facilement d'adapter le nombre de facteurs que nous souhaitons optimiser. Notre choix s'est donc porté sur trois facteurs pour les raisons évoquées ci-dessus, ce qui, au demeurant, autorise une représentation concrète et explicite de l'évolution vers la solution optimale puisque le simplexe se déplace alors dans un espace à trois dimensions. La recherche de l'optimum a lieu selon le schéma de la Figure III.18. Les conditions expérimentales correspondent aux coordonnées des sommets du simplexe.

Nous considérons, comme base, une série de quatre points constituant le simplexe de départ. Cela signifie que l'algorithme de recherche de la meilleure solution ne joue son rôle qu'après la quatrième expérience. A partir de là, il est nécessaire de connaître la réponse de la fonction objectif selon les critères expérimentaux définis et en chacun de ces points. Ainsi, il est possible d'éliminer le plus mauvais d'entre eux au profit de son opposé sur l'axe passant par le centre de gravité de la surface formée par les trois autres sommets (triangle (2 3 4) : Figure III.18).

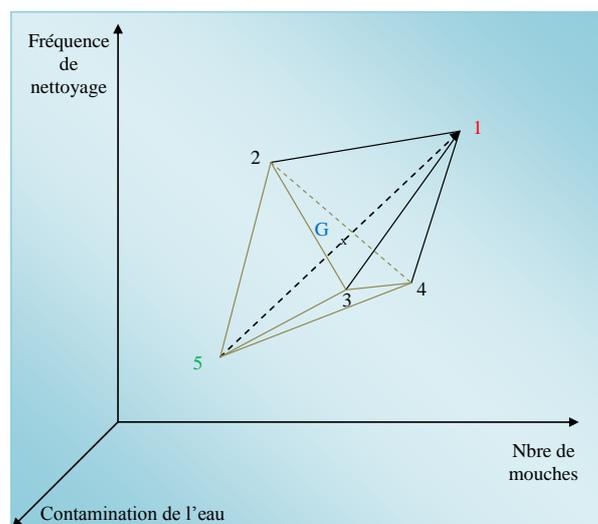


Figure III.18 : Déplacement du Simplexe dans l'Espace des Critères d'Optimisation Retenus

Le point 1 est abandonné pour le point 5. Le point G représente le centre de gravité du triangle (2 3 4).

Un nouveau simplexe est alors déterminé par le nouveau point et les trois sommets conservés. Les coordonnées de ce nouveau point représentent de nouveaux paramètres auxquels la réactivité de la SOA doit être mesurée en y associant une nouvelle expérience à réaliser. Par conséquent, la métaheuristique rétroagit sur le système en proposant de nouveaux scénarii mieux adaptés à l'objectif recherché. Pour permettre l'auto-génération de ces scénarii, nous devons alors définir la *fonction objectif* relativement au problème auquel nous voulons répondre.

Nous choisissons d'estimer l'évolution du système par rapport au nombre moyen d'oocystes présents dans l'organisme des bovins (vaches et veaux) durant la simulation. Ainsi, l'objectif est de minimiser cette quantité, ce qui revient à limiter l'étendue de l'épidémie. Les déplacements du simplexe, opérés dans l'espace de recherche, respectent les différentes règles d'évolution favorable évoquées dans la partie précédente (§II.1), et nous permet d'évaluer l'impact de chacun des facteurs sur l'évaluation de la fonction objectif précitée.

De plus, à l'image des scénarii que nous avons mis en place au Chapitre II et en considérant le caractère stochastique de la SOA réalisée, chaque simulation est répétée un nombre de fois fixé par l'expérimentateur et qu'il estime adéquat ou suffisant à l'obtention de résultats représentatifs de l'évolution du système. De même, la procédure de monitoring est itérée le nombre d'occurrences nécessaire à l'établissement des critères d'optimisation désirés (vitesse ou précision).

#### II.2.2.b. Simplexe de Départ et Déplacements

Concrètement, la métaheuristique réalise des calculs permettant, dans un premier temps, de définir les caractéristiques du simplexe de départ puis, dans un second temps, de déterminer les coordonnées des nouveaux points et d'augmenter l'efficacité de la progression du simplexe.

Le simplexe de départ peut éventuellement être pris aléatoirement. Cependant, nous avons montré qu'il est possible de formaliser la détermination du simplexe initial dont nous avons vu ci-dessus trois exemples.

Afin de retenir le simplexe de départ le mieux adapté à notre but et qui soit également en accord avec le système étudié, il convient de rappeler deux hypothèses :

- Il s'agit ici de minimiser le nombre de parasites dans l'organisme des bovins présents dans le système « étable ».
- Une réponse intuitive (bien que non avérée pour le moment) est de supposer que la meilleure solution est obtenue quand les trois facteurs choisis tendent vers 0.

Le simplexe de départ numéro 1 répond à ces exigences (Figure III.14). En effet, pour montrer l'efficacité du monitoring, la fonction objectif doit avoir une évaluation relativement mauvaise au point 1 du simplexe pour pouvoir être optimisée ensuite. Cela signifie que les coordonnées correspondant à ce point (notées  $(x, y, z)$ ) sont fixées à des valeurs relativement élevées afin que le nombre moyen d'oocystes chez les bovins puisse être amélioré significativement. De plus, comme nous supposons que la progression la plus appropriée pour le simplexe est dirigée vers l'origine des trois axes représentant les trois facteurs considérés, les signes de  $p$  et de  $q$  doivent être déterminés pour que le simplexe soit dans le cadran souhaité. Ainsi, en nous basant sur le Tableau III.1, nous obtenons la matrice d'expérience des quatre points du simplexe de départ suivante :

Point	Facteurs		
	Nb de Mouches	Fréq. de Net.	Cont. de l'Eau
1	x	y	z
2	x-p	y-q	z-q
3	x-q	y-p	z-q
4	x-q	y-q	z-p

Tableau III.3 : Matrice d'Expérience du Simplexe de Départ n°1

Si nous voulons effectivement que le simplexe soit orienté vers l'origine, il faut choisir des valeurs identiques pour  $x$ ,  $y$  et  $z$ . Nous illustrons ce principe par la Figure III.19 dans un espace à deux dimensions pour simplifier la représentation ; toutefois, la constatation reste la même dans un espace à  $n$  dimensions.

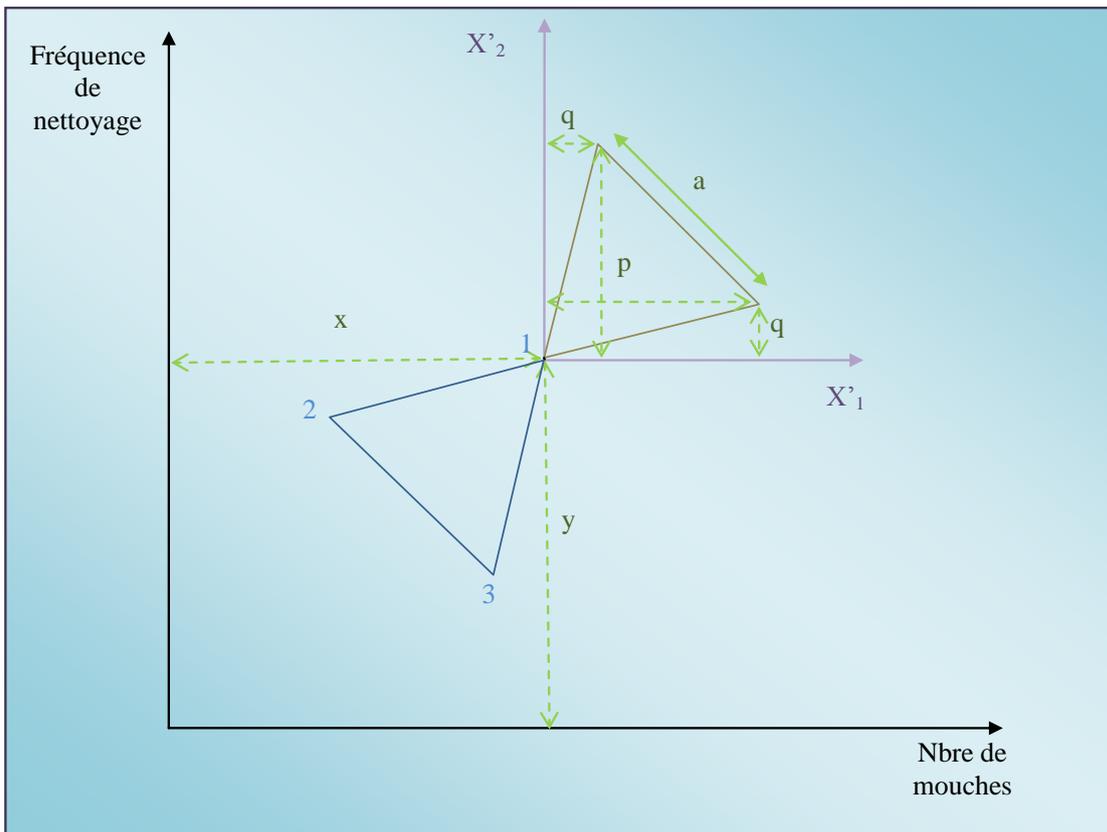


Figure III.19 : Adaptation du Simplexe de Départ n°1

Nous remarquons que nous réalisons une rotation de  $\pi$  du simplexe n°1 autour de l'origine des axes  $X'_1$  et  $X'_2$ . Si les valeurs de  $x$  et de  $y$  étaient différentes, il faudrait corriger en conséquence la valeur de cette rotation pour garder la même orientation de départ.

La matrice du Tableau III.3 est donc formée d'une ligne de coordonnées identiques ( $x = y = z = \lambda$ ), puis d'un tableau symétrique ne contenant que  $\lambda - p$  sur la diagonale principale et  $\lambda - q$  en dehors de la diagonale.

Les valeurs de  $p$  et  $q$  dans un espace à trois dimensions et en fonction de la distance entre deux points du simplexe ( $a$ ) sont exprimées de la façon suivante (Cf. Équation III.14) :

$$p = \frac{a}{3\sqrt{2}}(2 + \sqrt{4}) = \frac{4a}{3\sqrt{2}}$$

$$q = \frac{a}{3\sqrt{2}}(\sqrt{4} - 1) = \frac{a}{3\sqrt{2}}$$

Nous pouvons donc calculer  $p$  et  $q$  en fonction de la valeur de  $a$  choisie.

A partir du premier point et de la taille du simplexe de départ désirée ( $a$ ), nous sommes en mesure de définir les trois autres points constituant le simplexe de départ. Nous connaissons alors le jeu de coordonnées nécessaires avant le lancement de la métaheuristique proprement dite. Avant le lancement de l'algorithme, les quatre premiers ensembles de simulations, ayant pour paramètres ceux indiqués par le simplexe initial, sont exécutés et permettront de déterminer la réponse du système en chacun des points évoqués.

Pour ce faire, nous calculons, pour chaque simulation, la moyenne du nombre de parasites présents à chaque instant dans l'intégralité du cheptel. La simulation est répétée avec les mêmes paramètres un nombre de fois et pendant une durée déterminés par l'expérimentateur. Nous considérons finalement la moyenne globale des résultats obtenus pour toutes ces simulations comme étant la réponse du système, c'est-à-dire l'expression de la fonction objectif que nous cherchons à optimiser. Par conséquent, à chaque point du simplexe est associé un nombre d'oocystes permettant de savoir quel sommet abandonner lors de l'exécution de la métaheuristique. De cette façon, le simplexe se déplace de lui-même vers l'optimum désiré.

Il est possible d'optimiser la progression du simplexe, soit pour arriver plus rapidement au résultat, soit pour augmenter la précision de ce dernier.

Nous avons vu, au §II.1.1.a (Optimisation de la Recherche de l'Optimum), qu'en fonction de la valeur de  $Y_r$ , il est possible d'augmenter ou de diminuer la taille du simplexe. Son augmentation permet d'avancer plus rapidement vers l'optimum et sa diminution autorise une recherche plus minutieuse lorsque nous approchons du résultat escompté. L'expérimentateur détermine le critère d'arrêt du simplexe en choisissant un nombre d'expériences fini à réaliser (i.e. de rétroactions sur le système). Nous fixons alors une valeur de  $Y_r$  qui diminue progressivement à chacune de ces expériences et proportionnellement au nombre souhaité d'itérations.

Une autre possibilité a également été envisagée. Elle consiste à pondérer l'attraction des sommets du simplexe en fonction de leur évaluation par la fonction objectif. Au lieu de considérer le symétrique du point abandonné par rapport au centre de gravité, il est possible de le faire par rapport au barycentre pondéré des quantités d'ocystes normalisées associées à chacun des points délimitant cette surface. De cette façon le nouveau point obtenu se déplace davantage vers les points proposant des paramètres ayant une évaluation favorable à l'objectif recherché. Un exemple à deux dimensions est représenté par la Figure III.20. Toutefois, cette technique ne sera pas prise en compte dans les expériences exposées dans la suite car son impact positif n'a pas encore pu être formellement validé.

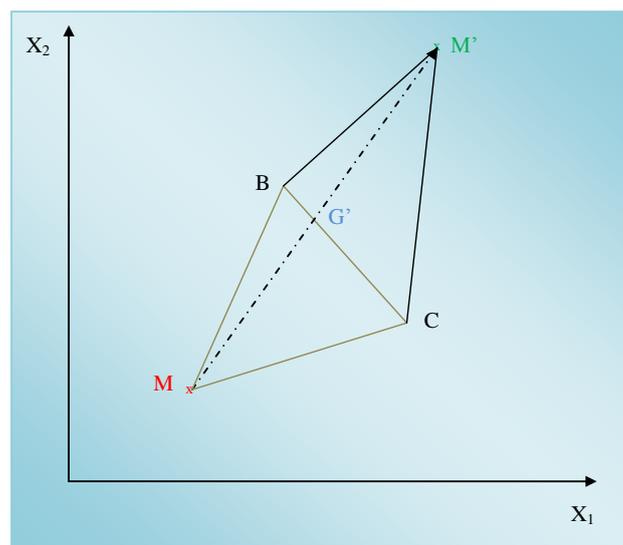


Figure III.20 : Optimisation du Déplacement du Simplexe

Dans la figure ci-dessus, nous considérons que l'évaluation de la fonction objectif au point B est meilleure que celle au point C. Par conséquent le centre de la symétrie est déplacé vers ce point proportionnellement à l'écart constaté avec l'évaluation réalisée au point C.

La durée d'une simulation est fixée par l'expérimentateur pour l'ensemble des expériences. De même, le nombre de bovins et leurs caractéristiques sont définis identiquement pour toutes les expériences. Ces paramètres constituent la situation expérimentale que le biologiste veut estimer.

Afin d'obtenir des données opérationnelles et utilisables simplement, nous avons stocké les résultats, obtenus pour chaque expérience sous forme de fichiers exploitables et lisibles directement (Annexe 3). De plus, l'évolution de la recherche de l'optimum est également stockée sous forme d'image représentant la projection du simplexe sur chacune des trois faces du repère utilisé. Les coordonnées des points étant aussi reprises dans un fichier exploitable directement par les biologistes.

Ce travail a pour but principal de fournir aux thématicien du domaine, un outil d'aide à la décision totalement autonome. De fait, l'expérimentateur n'a qu'à rentrer le nombre de bovins et leurs caractéristiques par l'interface dédiée et à lancer l'application (Annexe 3). Il récupère finalement les résultats de ses expériences dans un dossier prévu à cet effet. De plus, Il lui est possible de basculer à n'importe quel moment vers un mode d'utilisation lui permettant également de suivre plus en détail les expériences et les simulations.

Dans la partie suivante, nous mettons en place un ensemble de méta-scenarii nous permettant d'évaluer la solution proposée. Notre démarche s'inscrit dans la continuité de la validation de la SOA développée dans le Chapitre II.

## III. Résultats

### III.1. Procédure de Test

Nous avons procédé à différents ensembles d'expériences. Nous les appelons *méta-scenario* dans le sens où ils représentent les ensembles de données introduits dans le modèle servant au fonctionnement du méta-système.

Dans les méta-scenarii proposés, nous ne fixons ni le nombre de mouches présentes dans l'étable, ni la fréquence de nettoyage de cette étable, ni la contamination de l'eau en parasite. De fait, ces trois facteurs sont ceux définis par les coordonnées des points du simplexe associés à chaque expérience. Ils ne sont donc pas choisis directement par l'utilisateur. Néanmoins, la position  $\lambda$  du premier point du simplexe de départ, ainsi que la taille  $\alpha$  de ce simplexe sont laissées à l'appréciation de l'expérimentateur.

De plus, l'utilisateur a le choix d'optimiser le déplacement du simplexe de la façon exposée plus haut, ou, de garder, tout au long des expériences successives, la même taille de simplexe. Pour chacun des méta-scenarii suivants, nous avons testé à la fois la méthode optimisée et celle conservant la taille du simplexe de départ (Annexe 4).

Nous avons estimé que chaque expérience devait regrouper cinq simulations pour être représentative de l'évolution du système sous certaines contraintes imposées par les paramètres initiaux. Ainsi, nous utilisons les statistiques obtenues par ces ensembles de simulations pour évaluer la réaction du modèle aux paramètres donnés par les coordonnées des points du simplexe. Cette réaction nous permet alors de déterminer le résultat de notre fonction objectif.

Un critère d'arrêt du méta-système doit également être défini. Nous avons choisi de le baser sur le nombre d'itérations que le simplexe effectue pour trouver la meilleure solution. Nous avons remarqué, pour le problème qui nous intéresse, qu'une moyenne de 15 itérations convenait, dans la plupart des cas, à atteindre une solution acceptable. Nous réalisons donc, pour chaque méta-scénario, 19 expériences en considérant celles correspondant à l'évaluation de la qualité de la réponse aux paramètres imposés par les quatre premiers points du simplexe initial.

Nous détaillons dans la suite quatre types de méta-scénarii, leurs paramètres, leur intérêt et ce que nous avons déduit de leur évolution. L'objectif est de valider le fonctionnement du méta-système et de montrer, selon les cas, la prédominance de l'influence des facteurs à optimiser par rapport à la propagation du flux de parasites dans l'écosystème choisi.

### III.1.1. Méta-scénario A

Afin de montrer l'efficacité du système de monitoring, nous nous sommes basés, dans un premier temps, sur les scénarii mis en place au Chapitre II. Chaque simulation suit les postulats assujettis aux conditions du méta-scénario suivant :

- Présence de 5 vaches et 5 veaux ayant chacun un niveau d'immunocompétence propre (EIC = Etat d'ImmunoCompétence compris entre 0 et 1).

Vache n°	1	2	3	4	5	Veau n°	1	2	3	4	5
EIC	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	EIC	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6

Tableau III.4 : Méta-scénario A : Agents Présents

- Absence de parasite en début de simulation sur les vaches, les veaux ou les mouches
- Absence de contact entre les veaux et les vaches (box dans une étable)
- Temps de simulation : 30 jours

Par rapport aux paramètres des simulations du Chapitre II, la durée des simulations est augmentée de 10 à 30 jours. En effet, il est important de remarquer que le critère d'optimisation, c'est-à-dire le nombre de parasites présents en moyenne dans l'organisme des bovins, doit être évalué durant un temps suffisamment long pour être réellement représentatif de l'évolution des agents présents dans le modèle. Par conséquent, en choisissant une durée de simulation de 30 jours, nous appuyons davantage la véracité de la solution trouvée et apportons un argument supplémentaire à l'optimisation des facteurs pris en compte dans l'auto-génération des scénarii.

Les quatre premiers points sont fixés par le simplexe de départ comme explicité précédemment. Effectivement, nous avons vu qu'en fixant sa taille initiale ( $a$ ) ainsi que les coordonnées du premier point ( $\lambda$ ), nous pouvions en déduire les coordonnées des trois autres. Dans l'objectif de partir d'un point suffisamment éloigné de la réponse optimale présumée pour justifier une optimisation, nous définissons le Tableau III.5 :

Point	Facteurs		
	Nb de Mouches (X mouches dans l'étable)	Fréq. de Net (Nettoyage tous les Y jour).	Cont. de l'Eau (Z parasites pour 1L d'eau)
1	60	15	15
2	46	14	14
3	56	11	14
4	56	14	11

**Tableau III.5 : Méta-scénario A : Paramètres Induits par les Coordonnées du Simplexe de Départ**

La taille du simplexe ( $a$ ) est identique pour les trois facteurs dans le repère et avec l'échelle que nous avons définis.

A partir du point 5, les paramètres sont automatiquement calculés par le méta-système en fonction de ce simplexe de départ.

Nous retrouvons les résultats du méta-scénario A en Annexe 4. Nous pouvons observer la progression du simplexe sur les trois faces du repère constitué par les axes représentant les trois facteurs à optimiser.

Le nombre d'oocystes en circulation dans le système est diminué de 93% en moyenne par le méta-système entre la première et à la dernière expérience. Ces valeurs, relatives à l'évaluation de la fonction objectif, fluctuent entre 81% et 98% d'optimisation selon les tests effectués. En outre, nous remarquons que le simplexe se déplace de telle façon que sa progression minimise simultanément la fréquence de nettoyage et la contamination de l'eau. Au contraire, le nombre de mouches ne montre aucune tendance à la diminution mais fluctue autour de la valeur de départ.

Le méta-scenario A met en évidence le rôle principal joué, dans la dissémination du parasite, par la contamination de l'eau et par les conditions d'hygiène dans l'étable. De fait, les résultats obtenus laissent apparaître que le nombre de mouches dans l'étable a finalement peu d'importance si ces deux facteurs peuvent être contrôlés efficacement. Certaines expériences ont également montré un effet de « palier » allant dans ce sens ; la progression du simplexe implique dans un premier temps une diminution du nombre de mouches ; puis, plus la contamination de l'eau et la fréquence de nettoyage sont optimisées, plus la courbe décrite par le simplexe semble s'aplanir par rapport à l'axe **X**. Elle forme alors un « palier » en fluctuant dans un intervalle variable de valeurs au-delà duquel le nombre de mouche cesse de diminuer.

Un autre cas d'évolution, également représenté en Annexe 4 (méta-scenario A bis), a été observé à plusieurs reprises bien que de manière moins fréquente. Dans ce cas de figure, nous remarquons que la maîtrise du nombre de parasites dans l'eau est suffisante pour enrayer sa propagation dans l'écosystème. De fait, le simplexe n'évolue que selon l'axe **Z** (représentant la contamination de l'eau) et tourne autour des valeurs initiales selon les deux autres axes.

Nous en déduisons que le facteur à contrôler de prime abord est le taux de parasites dans l'eau distribuée aux bovins. Nous avons déjà soulevé le rôle majeur de l'eau dans la circulation du parasite étant donné les difficultés de le stopper par des systèmes de filtration classiques. Les résultats obtenus en matière de contamination d'eau se situent entre 0 et 2 parasites par litre d'eau dans tous les cas étudiés avec les paramètres du méta-scenario A.

D'autre part, l'importance d'un nettoyage fréquent est également mise en exergue par les expérimentations réalisées. Au regard des résultats donnés par le méta-système, il semble que nous observons dans une moindre mesure l'effet de palier que nous avons décrit pour le nombre de mouches. Ainsi, il est rare de trouver des fréquences de nettoyage supérieures à une fois par jour, et, d'une manière générale, elle se situe autour d'une fois tous les deux jours.

En ce qui concerne les mouches, nous observons des fluctuations pouvant aller de 50% d'effectif en moins à 10% de plus avec en moyenne une diminution de 18% des individus présents au départ. De fait, nous avons montré, dans le Chapitre II, que la mouche joue le rôle de vecteur du parasite. Sa présence permet donc aux parasites d'être véhiculé d'individus en individus et d'éventuellement contaminer tout le cheptel. Dans le cas d'une étable regroupant peu d'individus en mauvaise santé (comme celle que nous avons représentée ici), le nombre de mouches est alors un facteur peu déterminant quant à l'avenir du troupeau. En effet, une diminution suffisamment importante du nombre de parasites entrant dans le système, par le contrôle de l'eau d'abreuvement et l'élimination fréquente des matières fécales, nous permet d'enrayer efficacement la pandémie. Trop peu de parasites sont alors présents dans le système pour permettre à la mouche de transporter de façon significative le parasite et ainsi entraîner une infection manifeste des individus du cheptel.

Dans le méta-scénario B, nous allons tester notre système avec un nombre supérieur d'individus ayant des niveaux d'EIC variables. Ainsi, nous voulons nous assurer que les mesures à envisager sont les mêmes que dans un troupeau plus petit composé d'individus plus robustes ; en d'autres termes, nous voulons évaluer l'impact des facteurs à optimiser dans des conditions d'élevages différents.

### ***III.1.2. Méta-Scénario B***

Le méta-scénario B consiste à mesurer l'influence que le nombre d'individus et leur niveau d'immunocompétence (EIC) a sur le fonctionnement du méta-système.

Pour ce faire, nous avons, dans un premier temps, doublé le nombre d'agents présents dans le modèle :

- Présence de 10 vaches et 10 veaux ; les vaches et les veaux ayant chacun un niveau d'immunocompétence propre (EIC).

Vache n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
EIC	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0

Veau n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
EIC	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6

**Tableau III.6 : Méta-scénario B1 : Agents Présents**

Puis, dans un second temps, nous avons voulu évaluer la façon dont le méta-système réagit à un cheptel d'individus plus hétérogènes.

- Présence de 8 vaches et 8 veaux ; les vaches et les veaux ayant chacun un niveau d'EIC propre.

Vache n°	1	2	3	4	5	6	7	8
EIC	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9

Veau n°	1	2	3	4	5	6	7	8
EIC	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9

**Tableau III.7 : Méta-scénario B2 : Agents Présents**

Par ailleurs, nous conservons le même simplexe de départ que celui que nous avons choisi dans le méta-scénario A ainsi que les paramètres suivants :

- Absence de parasites en début de simulation sur les vaches, les veaux ou les mouches
- Absence de contact entre les veaux et les vaches (box dans une étable)
- Temps de simulation : 30 jours

- Simplexe de départ du méta-scenario A :

Point	Facteurs		
	Nb de Mouches (X mouches dans l'étable)	Fréq. de Net (Nettoyage tous les Y jour).	Cont. de l'Eau (Z parasites pour 1L d'eau)
1	60	15	15
2	46	14	14
3	56	11	14
4	56	14	11

**Tableau III.8 : Méta-scenario B : Paramètres Induits par les Coordonnées du Simplexe de Départ**

Les résultats obtenus sont récapitulés en Annexe 4. Ils sont exposés en deux temps selon que nous ayons, ou non, choisi d'optimiser la taille du simplexe.

En ce qui concerne les expériences effectuées avec vingt bovins (méta-scenario B1), nous constatons que le nombre d'individus n'influence pas l'analyse que nous avons faite pour le méta-scenario A. De même, l'optimisation de la fonction objectif reste dans les mêmes proportions. De fait, la progression du simplexe est similaire à celle que nous avons déjà observée et montre à nouveau la prédominance du facteur « contamination de l'eau » dans l'établissement de la pandémie. La fréquence de nettoyage diminue également mais de façon plus nette que lorsqu'il y a moins d'individus. Nous en déduisons que plus il y a d'individus, plus il y a d'excréments et par conséquent plus les nettoyages ont une influence significative. Le nombre de mouches est, par contre, toujours aussi peu variable. Nous en concluons que le nombre d'individus présents dans l'étable importe peu quant aux décisions à prendre en cas d'infection du cheptel, les valeurs des facteurs à optimiser rejoignant celles du méta-scenario A.

Cependant, il est important de noter la différence avec les résultats obtenus lorsque nous prenons en compte l'optimisation du déplacement du simplexe. Nous constatons que des résultats satisfaisants sont obtenus plus rapidement. De fait, l'agrandissement de la taille du simplexe pour les premiers déplacements permet d'atteindre efficacement la zone dans laquelle se trouve l'optimum recherché. Les premiers déplacements permettent de favoriser davantage la direction principale du simplexe. Cette progression optimisée correspond alors à des actions d'envergure sur le système permettant l'éradication rapide du parasite. D'autre part, la diminution de la taille du simplexe lors des dernières itérations permet une recherche précise de l'optimum. D'une manière générale, nous observons, au fil des expériences successives, une diminution rapide du nombre de parasites dans l'eau et une diminution progressive de la fréquence de nettoyage ; la recherche finale, plus fine, permet ensuite d'optimiser le nombre de mouches dans l'étable. Cela montre vraisemblablement que des traitements de fond, ayant une action plus restreinte et intervenant après la prise de mesures radicales, permettent également une diminution, même minime, du nombre de parasites circulant dans le système. Ces actions locales et continues permettent alors la pérennisation de l'éradication de *Cryptosporidium* dans les conditions décrites et concernent, avant tout, les moyens mis en œuvre contre les mouches.

Cela nous amène au méta-scénario B2 qui regroupe un panel d'individus plus large. L'ensemble du cheptel est globalement en moins bonne santé que pour le méta-scénario précédent. L'objectif est alors de voir comment le niveau de santé général du cheptel influence la résolution opérée par le méta-système. Les résultats obtenus montrent que, lorsque le déplacement du simplexe n'est pas optimisé (c'est-à-dire en considérant que nous effectuons une action modérée sur le système tout au long des expériences successives), le simplexe tourne sur lui-même dans tous les plans formés par les facteurs à optimiser.

Le nombre de parasites en circulation dans le système fluctue alors autour d'une valeur sans jamais être réellement optimisé. Le méta-système est incapable de trouver un moyen de diminuer le coût de la fonction objectif. L'isolement des bovins malades semble être alors la seule solution envisageable afin de retrouver des conditions proches de celles que nous avons testées précédemment (méta-scenario A) et permettre la diminution de la propagation de *Cryptosporidium* par des actions modérées.

D'autre part, il est possible d'appliquer au système des contraintes plus radicales comme nous le voyons dans les résultats obtenus avec les mêmes paramètres mais en choisissant d'optimiser les déplacements du simplexe (méta-scenario B2 optimisé). Nous constatons alors que, contrairement aux cas précédents, la contamination de l'eau ne joue plus le rôle principal dans la maîtrise du système. De fait, il semble plus efficace d'agir sur la fréquence de nettoyage et sur le nombre de mouches (qui représentent, par ailleurs, des facteurs plus largement contrôlables par des moyens simples).

Nous mettons, à nouveau ici, en évidence le rôle de vecteur de la mouche. En effet, lorsque le nombre de parasites dans le système est grand, il s'autoalimente par la reproduction au sein de l'organisme des bovins. Ainsi, la quantité de parasites amenée par l'eau n'a finalement d'importance qu'en tant que vecteur primaire de la maladie puisque le nombre de parasites développés par les bovins rend cet apport négligeable. Par contre, les mouches en particulier et les insectes en général sont alors responsables de la dissémination du parasite et donc de la durabilité de son développement au sein de l'écosystème. De même, la gestion des conditions d'hygiène est alors essentielle pour bloquer la pandémie et éviter que les individus les plus faibles soient atteints par *Cryptosporidium* et contaminent l'ensemble du cheptel

L'état d'immunocompétence des bovins joue, de toute évidence, un rôle majeur quant aux décisions à prendre pour limiter la dissémination de *Cryptosporidium*. Nous constatons également, qu'à partir d'un certain niveau d'optimisation, il reste intéressant de diminuer le taux de parasites dans l'eau afin d'en limiter le nombre en circulation dans le système.

Il nous est alors apparu important de prendre en considération deux autres possibilités de configurations du système « étable ».

La première permet d'évaluer l'influence de l'état initial des facteurs à optimiser qui peuvent être plus ou moins importants au début des simulations. Autrement dit, nous souhaitons, au travers du méta-scenario C, estimer l'impact d'un éloignement ou d'un rapprochement du simplexe initial par rapport à l'origine du repère où évolue le simplexe.

La seconde concerne le vecteur initial du parasite qui, jusqu'alors, n'était représenté que par l'eau. Ainsi, le méta-scenario D, nous permet d'observer l'influence de l'introduction d'un sixième veau porteur ayant un EIC variable et s'inscrit alors dans la continuité des scénarii proposés au Chapitre II.

### III.1.3. Méta-scenario C

Dans le méta-scenario C, nous cherchons à mesurer l'importance de la position du simplexe de départ dans la recherche de l'optimum. Ainsi, nous étudions les répercussions observées lorsque le simplexe de départ s'éloigne ou se rapproche de l'origine (point que nous supposons être l'optimum avant expérimentation).

Nous gardons les conditions expérimentales du méta-scenario A :

- Présence de 5 vaches et 5 veaux ; les vaches et les veaux ayant chacun un niveau d'immunocompétence propre (EIC = Etat d'ImmunoCompétence compris entre 0 et 1).

Vache n°	1	2	3	4	5	Veau n°	1	2	3	4	5
EIC	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	EIC	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6

Tableau III.9 : Méta-scenario C : Agents Présents

- Absence de parasite en début de simulation sur les vaches, les veaux ou les mouches.
- Absence de contact entre les veaux et les vaches (box dans une étable).
- Temps de simulation : 30 jours.

Puis, nous testons le méta-système sur deux simplexes de départ différents :

↳ *Le premier est plus proche de l'origine (méta-scenario C1) :*

Point	Facteurs		
	Nb de Mouches (X mouches dans l'étable)	Fréq. de Net (Nettoyage tous les Y jour).	Cont. de l'Eau (Z parasites pour 1L d'eau)
1	40	10	10
2	31	9	9
3	38	8	9
4	38	9	8

Tableau III.10 : Méta-scenario C1 : Paramètres Induits par les Coordonnées du Simplexe de Départ

↳ *Le second est plus éloigné de l'origine (méta-scenario C2) :*

Point	Facteurs		
	Nb de Mouches (X mouches dans l'étable)	Fréq. de Net (Nettoyage tous les Y jour).	Cont. de l'Eau (Z parasites pour 1L d'eau)
1	80	20	20
2	67	19	19
3	76	16	19
4	76	19	16

Tableau III.11 : Méta-scenario C2 : Paramètres Induits par les Coordonnées du Simplexe de Départ

Par ailleurs, nous attirons l'attention sur le fait que, pour le méta-scenario C1 (Tableau III.10), la taille du simplexe  $\alpha$  est réduite par rapport aux autres méta-scenarii (ce qui correspond à une action plus modéré sur le système).

Nous soulignons également que, dans le cas du méta-scenario C2, le nombre d'itérations est augmenté à 24 expériences (20 itérations plus les 4 points du simplexe de départ).

Les résultats des méta-scenarii C1 et C2 sont visibles en Annexe 4. Ils sont exposés en deux parties selon que nous ayons choisi d'optimiser la taille du simplexe ou non.

Pour le méta-scenario C1 (dans sa version optimisée ou non), l'évolution du simplexe est similaire à celle observée pour le méta-scenario A. La progression du méta-système montre à nouveau la prédominance de la contamination de l'eau et atteint des proportions allant jusqu'à 98% d'optimisation de la fonction objectif entre la première valeur relevée et la dernière. D'autre part, nous observons une diminution de l'intervalle entre deux nettoyages ainsi que du nombre de mouches (bien que la régression de ce dernier facteur soit un peu moins accentuée). Il semble que ces deux paramètres atteignent un seuil se trouvant généralement autour des 50% d'optimisation de la fonction objectif et au-delà duquel ils n'évoluent plus de manière significative. Nous observons alors nettement la notion de « palier » que nous avons abordée dans le cas du méta-scenario A. Les valeurs relevées pour ce palier sont généralement d'une dizaine de mouches et d'un nettoyage complet tous les 5 jours. Par ailleurs, les résultats relevés dans le cas de l'optimisation du déplacement du simplexe confirment l'efficacité de cette amélioration. Cela permet de diminuer plus rapidement le nombre de parasites en circulation dans le système et d'atteindre des niveaux d'optimisation allant jusqu'à 100%. Nous remarquons, dans ce sens, que le simplexe tend alors vers l'origine comme nous l'avions suggéré au début de cette partie.

Nous en concluons que si l'étable a fait l'objet d'un entretien suffisamment soutenue et permanent avant l'arrivée du parasite dans le système, il est possible de limiter la pandémie rapidement par des actions modérés sur les fréquences de nettoyage et sur le nombre de mouches. Il apparaît également que l'eau reste un facteur déterminant dans l'élaboration de la pandémie. Par conséquent, dans l'objectif de limiter au plus l'apparition d'épidémies importantes et difficilement maitrisables dans les élevages, le taux de parasites dans l'eau d'abreuvement doit y être régulièrement contrôlé.

Dans le cas d'un simplexe de départ relativement éloigné de l'origine (méta-scenario C2 qui correspond à la contamination d'une étable mal entretenue), nous retrouvons toujours nettement la priorité de traiter les problèmes liés à l'eau. La diminution du nombre d'oocystes dans l'eau permet d'obtenir des résultats similaires en termes d'optimisation de la quantité de parasites en circulation mais avec un nombre d'itérations plus grand.

De plus, L'utilisation de l'optimisation du déplacement du simplexe montre, à nouveau, l'importance d'éliminer les insectes dans un environnement où le parasite est en nombre important. De fait, étant donnés les paramètres considérés pour ce méta-scenario constituant des mauvaises conditions générales de départ, la quantité de parasites a tendance à augmenter rapidement. La mouche, en tant que vecteur principal, permet au parasite de continuer à infecter les individus et joue un rôle important dans l'apparition des épidémies à *Cryptosporidium*. Selon les résultats obtenus, pour opérer un traitement rapide et radical, il est donc essentiel de traiter parallèlement la contamination de l'eau et le nombre de mouches présentes dans l'étable.

La position du simplexe de départ a donc une relative importance dans la recherche de l'optimum. La position de ce simplexe décrit les conditions d'entretien de l'exploitation au moment où les parasites sont introduits dans le cheptel pour la première fois ; les résultats obtenus influencent donc de manière importante l'orientation principale du simplexe. En effet, le simplexe a tendance à prendre la direction qui optimise le plus son déplacement. Or, plus les conditions initiales sont mauvaises, plus le nombre de parasites en circulation dans le système est grand et plus l'action sur le système doit être importante pour modifier cette quantité. Ainsi, Il est intéressant de voir quelle est la progression du méta-système en fonction de l'éloignement de la zone représentant l'optimum : plus nous nous éloignons de cet optimum, plus nous mettons en évidence les facteurs primordiaux dans l'optimisation de la fonction objectif, et, plus nous nous en rapprochons, plus les actions sur les facteurs secondaires seront significatives.

### III.1.4. Méta-scénario D

Jusqu’alors, dans tous les méta-scénarii exposés, le seul vecteur primaire du parasite était l’eau. Le méta-scénario D vient compléter l’analyse faite au Chapitre II en montrant l’influence de l’introduction du parasite par un sixième veau extérieur à l’étable. Nous observons la progression du simplexe dans les conditions suivantes :

- Présence de 5 vaches et 6 veaux ; les vaches et les veaux ayant chacun un EIC propre.

Vache n°	1	2	3	4	5
EIC	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0

Veau n°	1	2	3	4	5	6
EIC	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,3 / 0,5

Tableau III.12 : Méta-scénario D : Agents Présents

- Arrivée de 50 oocystes par un sixième veau dont l’EIC est alternativement de 0,3 et de 0,5.
- Absence de parasite en début de simulation sur les cinq autres veaux, les vaches ou les mouches.
- Absence de contact entre les veaux et les vaches (box dans une étable)
- Temps de simulation : 30 jours.

Nous choisissons de prendre le même simplexe de départ que pour le méta-scénario A :

Point	Facteurs		
	Nb de Mouches (X mouches dans l’étable)	Fréq. de Net (Nettoyage tous les Y jour).	Cont. de l’Eau (Z parasites pour 1L d’eau)
1	60	15	15
2	46	14	14
3	56	11	14
4	56	14	11

Tableau III.13 : Méta-scénario D : Coordonnées du Simplexe de Départ

Les résultats sont donnés en Annexe 4. En fonction de l'EIC du veau n°6, nous distinguons le méta-scénario D1 (EIC = 0,3) et le méta-scénario D2 (EIC = 0,5). Nous choisissons ces niveaux d'immunocompétence de part et d'autre du seuil (EIC = 0,4) que nous avons déduit des simulations du Chapitre II.

Dans les résultats du méta-scénario D1, nous remarquons que le facteur « contamination de l'eau » perd de son importance au profit de la fréquence de nettoyage. En effet, la durée espaçant deux nettoyages diminue plus vite que le nombre de parasites par litre d'eau.

Au contraire, dans le méta-scénario D2, nous retrouvons des résultats équivalents à ceux exposés pour le méta-scénario A : la contamination de l'eau retrouve toute son importance.

Nous déduisons de ces observations que la nature du vecteur primaire a un rôle non négligeable quant aux décisions à prendre pour éviter la pandémie. Par ailleurs, s'il s'agit d'un bovin, l'observation conjointe de l'évolution des deux méta-scénarii nous permet de confirmer l'impact qu'a l'EIC du vecteur primaire. Il est donc important de remarquer rapidement l'introduction du parasite dans les élevages mais également de déterminer comment il y est entré afin de pouvoir combattre efficacement sa dissémination.

## **III.2. Discussion**

D'une manière générale, le méta-système joue son rôle : il optimise le nombre de parasites en circulation dans le système en agissant sur les propriétés de ce dernier. Il nous permet également de déduire de sa progression les facteurs prédominant qui interviennent dans la propagation du parasite au sein de l'étable en fonction de différentes configurations de départ.

Au travers des méta-scénarii mis en place, nous avons pu confirmer certaines hypothèses et également en développer de nouvelles quant aux actions à mettre en œuvre lors de la contamination d'une étable par *Cryptosporidium*.

Tout d'abord, nous avons observé que, dans la grande majorité des cas, la contamination de l'eau représente le facteur ayant le plus grand poids dans l'installation d'une pandémie. Nous retrouvons son influence sur la quasi-totalité des méta-scenarii testés. Elle se positionne donc vraisemblablement comme le facteur primordial à maîtriser. La problématique principale se trouve au niveau du fait que les épidémies recensées dans la littérature ont montré que l'eau potable peut transmettre des maladies même lorsque les valeurs des paramètres microbiologiques sont respectées.

Montandon (Montandon, 1998) a mis en évidence l'importance d'effectuer des mesures fréquentes de la contamination de l'eau afin d'éviter une épidémie. D'autre part, il effectue la comparaison des concentrations en oocystes déterminées pendant les épidémies et en période normale. Cela permet d'estimer qu'un risque d'épidémie devient réel lorsque la teneur en oocystes atteint ou dépasse la valeur de 30 oocystes par 100 litres. De plus, il ajoute que le parasite contamine fréquemment les eaux de surface, la concentration en oocystes étant plus importante dans les eaux souillées par des matières fécales. De fait, les bovins ne respectant évidemment pas des règles d'hygiène strictes, le taux d'oocystes présents dans les abreuvoirs d'une étable infectée dépasse souvent les 50 oocystes pour 100 litres (Follet, 2005). Les risques sont donc élevés dans les élevages bovins une fois que le cheptel a été infecté car il devient alors réellement compliqué de maîtriser l'épidémie.

Ces constatations montrent la nécessité de traiter le problème à la source. L'eau étant le vecteur primaire le plus déterminant, il est important de prendre des mesures en amont. Pour ce faire, des systèmes de filtration innovants sont aujourd'hui proposés afin d'éviter que des parasites comme *Cryptosporidium* soit susceptible de se retrouver dans l'eau de distribution.

Notamment, la ville de Grasse a inauguré le 17 mars 2007 une station d'épuration équipée d'un réacteur membranaire biologique permettant une dépollution des eaux usées et une maîtrise du risque sanitaire (Aquasource & Degrémont, 2006). Cette station utilise une première technologique qui permet de mieux filtrer les bactéries, les virus et les microorganismes. Cette méthode associe un traitement biologique à une filtration des eaux usées au travers de membranes organiques comprenant des pores dix mille fois plus petits que ceux de la peau (environ 4 centième de micron). Elles constituent donc une barrière physique qui arrête les parasites et les différents éléments en suspension dans l'eau, sans ajout de réactif. La ville de Grasse anticipe ainsi la réglementation européenne qui vise au bon état écologique des masses d'eau à l'horizon 2015. Ainsi, il est probable que les problèmes liés à la présence de *Cryptosporidium* dans l'eau puissent commencer à être maîtrisés plus efficacement à l'horizon de cette échéance.

Le second facteur que nous avons voulu éprouver dans les méta-scenarii est le nombre de mouches dans l'étable. Il semble que ce facteur ait une influence générale moins prononcée que les deux autres facteurs. Toutefois, le contrôle du nombre d'insectes peut s'avérer être d'une grande importance dans des cas précis. En effet, si de mauvaises conditions globales sont réunies à un moment donné dans une étable, le facteur « mouche » est alors celui qu'il faut traiter en premier pour bloquer l'évolution du parasite. Le traitement contre les mouches s'inscrit alors dans la durée pour éviter toute pandémie après l'introduction du parasite. Plusieurs moyens sont possibles pour traiter les problèmes liés aux mouches. Nous pouvons citer les insecticides ou encore des larvicides mais également les lampes UV, les moustiquaires ou encore les attrape-mouches (contiennent des appâts et de la levure). En outre, quel que soit les moyens mis en œuvre, la propreté des bâtiments et de ses abords contribue au contrôle des insectes et à une meilleure efficacité des insecticides. L'hygiène est donc une clé essentielle de la réussite du traitement sachant que 90 % des mouches présentes sont nées sur l'élevage (Chauvin, 2002).

La priorité concerne donc le traitement des larves. Les produits utilisés empêchent la synthèse de la cuticule. Comme la larve doit en changer plusieurs fois lors de sa croissance, elle meurt. Le cycle est cassé. Cependant, il est également essentiel de traiter les bovins sinon les mouches adultes ne seront pas totalement repoussées, et le traitement perdra de son efficacité.

La notion de nettoyage est donc fortement liée à la quantité de mouches et par conséquent doublement lié à la propagation du parasite. Dans ce contexte, les scénarii nous permettent de mettre en évidence le rôle joué par l'homme dans l'élevage. En effet, comme le montrent les résultats obtenus, la fréquence des nettoyages dans l'étable s'avère être un facteur limitant la propagation du parasite. De fait, le parasite se retrouvant dans les excréments des bovins, il est important de pouvoir maîtriser ce facteur en particulier quand l'eau est l'unique vecteur primaire de la maladie. L'apparition d'un palier dans la représentation graphique démontre qu'il ne s'agit pas de prendre des mesures drastiques mais bien de s'assurer que les nettoyages sont suffisants pour garantir un minimum de transmission entre individus. Il est notamment recommandé de nettoyer les zones de repos des bovins ainsi que les endroits qui ne sont pas piétinés ; en effet, les seconds sont les lieux où les larves de mouches sont susceptibles de se développer. D'autres méthodes peuvent intervenir dans ce cadre notamment les techniques d'hydrocurage. Elles sont mises en œuvre pour nettoyer les aires d'exercice et transférer les déjections du bâtiment vers les ouvrages de stockage. Plusieurs techniques sont recensées dans les élevages. Le manque de données concernant certains systèmes ne permettent pas de statuer sur leur fonctionnement de manière générale. Cependant, deux méthodes sont plus souvent rencontrées : la séparation de phase par filtration statique et la séparation de phase mécanique. Ces deux façons de procéder permettent à la fois d'évacuer les déjections mais également de récupérer du lisier et éventuellement du fumier.

## *IV. Conclusion et Perspectives*

Il semble aujourd'hui important de pouvoir démontrer le bon fonctionnement de la SOA et du méta-système associé sur des cas réels. Dans ce sens, nous avons développé, tout au long de ce travail, des relations avec plusieurs éleveurs bovins. Dans l'objectif de mettre en application nos résultats et d'apporter une validation supplémentaire à la SOA et au méta-système, il serait intéressant d'élargir nos contacts à d'autres exploitations. Nous serions ainsi en mesure d'étudier un panel diversifié d'élevages ayant des conditions et des niveaux d'infection différents allant de l'étable où uniquement des traces du parasite sont présentes, à des exploitations où l'épidémie est largement installée. Ainsi, la mise en place des mesures que le méta-système a fait émerger, selon les caractéristiques de l'élevage et avec un suivi approprié, permettrait de venir appuyer de façon formelle le bon fonctionnement de la méthode que nous proposons. Cependant, ce type d'expérimentation est long à mettre en place et demande la création d'un réseau efficace pour permettre le suivi des exploitations et la circulation des informations.

Toujours est-il, en attendant la mise en place d'un tel réseau de communication, nous pouvons d'ors et déjà rendre compte de l'efficacité de notre système de monitoring. En effet, comme nous l'avons évoqué plus haut, nous nous sommes basés essentiellement sur des facteurs dont nous supposons déjà l'évolution dans le cadre de l'optimisation du nombre de parasites en circulation dans le système. De fait, le méta-système permet de confirmer ces hypothèses. Il remplit alors son rôle de système d'aide à la décision en nous suggérant une marche à suivre structurée selon les différents cas représentés par les méta-scenarii. Les démarches proposées par le méta-système donnent la possibilité à l'utilisateur de cibler davantage son action sur les facteurs prépondérants dans un cas de figure précis et induit ainsi une augmentation significative de l'efficacité des mesures mises en œuvre.

En ce qui concerne la circulation de *Cryptosporidium*, nous envisageons de tester le méta-système sur un nombre de cas plus importants encore. Si nous pouvons rassembler suffisamment d'élevages, il pourrait être intéressant de modéliser chacun d'entre eux et d'y adapter la résolution. Nous envisageons par exemple de modifier la fonction objectif pour inclure d'autres notions dans l'optimisation (comme le nombre d'animaux mort par exemple). En effet, cette fonction peut dépendre de n'importe quels autres critères et permet également de leur donner un poids plus ou moins important dans l'optimisation. Il est donc possible d'imaginer un nombre très important de cas pouvant être étudiés. Il faut toutefois toujours garder en tête que les méta-scenarii demandent des ressources matérielles importantes. De plus, leur exécution demande un temps relativement long afin d'en effectuer un nombre suffisant pour repérer les tendances récurrentes dans le déplacement du simplexe. Il faudra donc faire un choix de façon à permettre l'émergence de solutions dans une durée appropriée aux différents impératifs.

D'autre part, nous avons vu la multitude de domaines dans lesquels les SMA sont développés en tant qu'outil d'expérimentation. Nous souhaitons pouvoir tester cette méthode sur d'autres SOA ayant des applications dans divers secteurs scientifiques. Le méta-système que nous avons présenté a, par nature, une grande adaptabilité. Cela permet de le tester sur de multiples cas sans que la granularité de la SOA ou la manière dont elle est implémentée viennent faire obstacle à son intégration. Ainsi, nous voulons montrer les performances de la démarche proposée et son universalité.

Parallèlement à la réalisation de nouveaux méta-scenarii capables de venir confirmer le bon fonctionnement du méta-système et d'apporter des réponses dans de multiples domaines, nous souhaitons également continuer à faire évoluer notre méthode. Nous avons dans ce sens envisagé plusieurs pistes. Nous pensons notamment à préciser l'analyse effectuée par le méta-système par des méthodes issues de *l'analyse factorielle*.

Une analyse factorielle est la réduction d'une matrice de données géographiques à quelques grands groupes. Une méthode quantitative (analyse multivariée) tente d'expliquer la portion la plus grande de la variance totale (cas d'une analyse en composantes principales, ACP) ou de la covariance (cas de l'analyse factorielle) par de nouvelles variables (créées de toute pièce par l'analyse) appelées « composantes », « facteurs » ou « axes factoriels » ; ces variables dites « latentes » ne sont donc pas mesurées mais plutôt générées. Ces composantes ou facteurs regroupent, dans une certaine mesure, des éléments ou encore des variables corrélées dans le but d'expliquer un phénomène par une quantité plus restreinte d'éléments. Cette technique nous permettrait de préciser l'analyse effectuée par le méta-système et ajouterait également la possibilité de la réaliser sur un grand nombre de facteurs.

D'autres pistes sont également envisageables du côté des techniques de *data mining* (fouille de données). Les méthodes qu'elles utilisent ont pour objet l'extraction de connaissances à partir d'un grand nombre de données. Nous pouvons également imaginer « agentifier » le système de monitoring, c'est-à-dire incorporer le méta-système au niveau des agents et ainsi rétroagir en cours de simulation sur le devenir du système. Nous obtiendrons alors un Méta-SMA capable d'agir à plusieurs niveaux de résolution.

# Conclusion et Perspectives

---

Le travail que nous exposons dans ce mémoire repose essentiellement sur les notions de *système* et de *modèle*. Nous avons défini le *modèle* comme une représentation simplifiée, une abstraction, du *système* que nous souhaitons étudier. Dès lors, différentes méthodes peuvent être employées dans la réalisation de modèles en fonction du choix des limites du système, des questions que l'étude soulève et des niveaux d'abstraction et de détail qui y sont corrélés. A travers cette définition, nous avons montré les difficultés introduites par l'utilisation de méthodes analytiques traditionnelles dans l'étude de systèmes complexes et l'intérêt d'adopter alors le point de vue de la *systémique*. Ce type de systèmes comprend de nombreuses entités et la multitude d'interactions qui ont lieu entre elles leur procurent un caractère peu prédictible. Cette constatation a mis en évidence les avantages de procéder à une modélisation par la simulation.

Nous avons voulu, tout au long de ce travail, montrer l'intérêt et les limites des méthodes issues de l'Intelligence Artificielle Distribuée (IAD) et de la Vie Artificielle (VA) dans la modélisation de systèmes naturels. Ces méthodes se basent sur la notion de simulation pour représenter l'émergence de phénomènes dans des systèmes composés d'un nombre important d'individus en interaction. L'idée qu'elles avancent est de paramétrer des automates simples pour voir émerger de leurs interactions des structures dynamiques complexes ayant des propriétés différentes des règles initialement programmées. Ce principe est en particulier inspiré du comportement que nous retrouvons chez certains insectes sociaux comme la fourmi.

Dans ce contexte, les techniques à base de Systèmes MultiAgents (SMA) nous sont apparus comme l'outil le plus représentatif des principes développés dans les domaines de l'IAD et de la VA. Nous programmons le comportement individuel d'agents autonomes simples (réactif car réagissant à des stimuli) mis en interaction via un environnement pour voir émerger les phénomènes de plus haut niveau que nous cherchons à modéliser.

Des simulations permettent alors à l'expert du domaine concerné d'observer l'évolution conjointe du système dans sa globalité et des entités le constituant. Le suivi des interactions entre les différents individus du système et avec l'environnement permet ainsi d'étudier les flux de données qui y sont échangés (information, nourriture, virus, etc...).

Nous avons également exposé les difficultés rencontrées lors des différentes phases de la réalisation d'un outil expérimental à base de SMA. Nous faisons d'ailleurs la distinction entre les principes évoqués dans la théorie sur les SMA et les applications à base de cette technique que nous préférons nommer Simulation Orientée Agent (SOA). Nous avons montré que le caractère multidisciplinaire est indissociable de la réalisation d'une SOA. De plus, le manque de standardisation et de formalisation, dans ce contexte, entraîne l'apparition d'une multitude de définitions et de moyens mis en œuvre pour arriver au résultat escompté. Il est alors courant que chaque domaine d'application (voire chaque réalisation) ait développé le besoin de mettre en œuvre des moyens différents, avec leurs propres nuances, les écartant plus ou moins des définitions théoriques initiales.

S'il est difficile de se contraindre à un cadre technique spécifique, en revanche, la méthodologie et les étapes de conception restent inconditionnellement les mêmes. Nous représentons l'évolution de la modélisation par SOA en fonction de trois rôles essentiels à sa conception. Le thématique, le modélisateur et l'informatique doivent ainsi travailler de concert pour que le résultat final corresponde aux attentes initiales et aux objectifs fixés. En effet, la validation d'une SOA est une étape délicate puisque l'outil obtenu se positionne comme un laboratoire virtuel permettant de réaliser des expériences qui auraient été trop longues, trop compliquées ou trop dangereuses à réaliser réellement. De fait, il est difficile de contrôler les résultats obtenus avec des expériences existantes. Les rétroactions entre les trois acteurs évoqués sont alors indispensables à la réalisation du projet et permet l'obtention de simulations en corrélation avec la réalité. De plus, les difficultés d'analyse de telles simulations sont alors réduites par la compréhension mutuelle des objectifs que chacun poursuit et par l'acquisition des connaissances nécessaires à leur concrétisation.

Nous avons utilisé cette méthodologie dans la réalisation d'une SOA dans le domaine de l'épidémiologie, plus particulièrement dans l'étude des flux de parasites circulant dans un écosystème semi-naturel. Nous avons choisi de travailler sur *Cryptosporidium*, parasite intestinal particulièrement difficile à combattre par des méthodes de désinfection traditionnelle et véhiculé principalement par l'eau. C'est pour ces raisons en particulier que les biologistes, avec qui nous avons travaillé, veulent en apprendre davantage sur la circulation de ce parasite. D'autre part, nous avons vu que *Cryptosporidium* pose de nombreux problèmes sanitaires et de santé publique notamment dans le cadre des élevages bovin. Notre étude s'est donc portée sur cette espèce dans le but de limiter la dissémination et la prolifération du parasite dans une étable.

Nous avons défini plusieurs types d'agents ayant chacun leurs caractéristiques et pouvant interagir avec les autres agents présents dans l'environnement. Les règles de transmission et d'évolution du parasite ont été mises en place avec les biologistes et introduites dans chacun des agents selon leurs spécificités. Afin de valider la SOA et pour apporter des éléments de réponse quant à la circulation du parasite, nous avons mis en place des scénarii permettant de tester le modèle selon différentes configurations des paramètres de simulation. Ainsi, au travers de ces scénarii, les tests effectués ont démontré la corrélation des simulations avec la réalité et ont également rempli un rôle explicatif et prédictif en nous permettant, avec les biologistes, d'émettre de nouvelles hypothèses sur la propagation du parasite. Les résultats obtenus dans les premières simulations soulignent déjà le rôle important que peuvent jouer les insectes dans la transmission du parasite aux animaux présents dans l'élevage. Il nous apparaît alors évident que l'eau n'est plus le seul élément vecteur à contrôler en cas d'infection par *Cryptosporidium* ; le nombre d'oocystes transportés par les insectes qui fréquentent l'élevage pourrait, à lui seul, être à l'origine d'une pandémie sachant d'autant plus que nous avons également mis en évidence que le niveau de santé des bovins concernés a une importance considérable.

Bien que la SOA que nous avons réalisée nous ait permis d'apporter un premier ensemble de réponses aux biologistes et l'opportunité de faire de nouvelles hypothèses, elle a également montré les limites des techniques basées sur les systèmes multiagents, notamment dans le cadre de l'élaboration d'un outil d'aide à la décision *autonome*. De fait, l'analyse des résultats obtenus peut être compliquée et fastidieuse. C'est pourquoi il est important d'apporter un niveau supplémentaire à la SOA en introduisant un système capable de réaliser son monitoring de manière autonome. Nous proposons une solution basée sur le concept de métaheuristique et plus particulièrement sur la notion de *simplexe*. La rétroaction sur le système par l'autogénération de scénarii permet une exploration de l'espace des solutions correspondant à une problématique précise et l'émergence d'une configuration optimisée du système dans le but d'apporter des réponses aux questions soulevées par cette problématique. Ainsi la prise de décision par rapport à une situation précise de contamination par *Cryptosporidium* est largement augmentée puisque résultante de l'émergence d'une configuration adéquate du système obtenue de manière autonome par le méta-système mis en place.

Dans l'objectif de tester et de valider le méta-système en question, nous avons proposé un ensemble de méta-scénarii nous permettant d'évaluer l'influence de plusieurs facteurs susceptibles d'influencer la propagation de *Cryptosporidium*. Pour ce faire, nous avons pris en compte, dans l'optimisation du nombre total de parasites en circulation dans le système (représentant la fonction objectif), la contamination de l'eau, le nombre de mouches dans l'étable et la fréquence de nettoyage. Notre choix s'est porté sur ces trois facteurs pour, d'une part, confirmer les hypothèses que nous avons faites lors de l'analyse des scénarii, et, d'autre part, pour le caractère intuitif de l'optimisation de ces facteurs. En effet, étant donné le peu d'informations disponibles actuellement sur des facteurs plus élaborés (comme l'impact d'un traitement thérapeutique sur les bovins par exemple) et après concertation avec les biologistes, nous avons choisi d'agir sur des caractéristiques du système dont nous supposons déjà l'évolution. L'objectif est alors de valider efficacement le fonctionnement du méta-système.

Ainsi, les méta-scenarii mis en place apportent la confirmation des hypothèses que nous avons faites précédemment sans pour autant apporter de précisions significatives sur d'autres aspects du système « étable ». Les résultats obtenus se sont avérés particulièrement prometteurs et ont montrés l'efficacité du procédé de monitoring basé sur la notion de simplexe.

Cela nous permet aujourd'hui d'avoir de nombreuses perspectives quant à l'évolution du méta-système dont nous aimerions améliorer le degré d'analyse pour apporter des réponses plus précises et adaptées. Nous envisageons plusieurs possibilités d'évolution selon différents aspects perfectibles.

Tout d'abord, nous souhaitons augmenter le nombre et la pertinence des facteurs à optimiser. Nous avons par exemple évoqué l'intérêt qu'il y aurait de pouvoir évaluer l'impact d'un traitement thérapeutique sur les bovins. Le méta système nous permettrait notamment de connaître l'usage à préconiser pour rendre son action optimale. Nous pouvons également concevoir de vouloir déterminer le temps qu'il faut isoler un animal malade pour éviter qu'il ne déclenche une pandémie ou encore les conditions optimales de température et d'humidité qui permettraient de limiter la prolifération du parasite dans l'étable. Aussi, nous envisageons de modifier la fonction objectif en fonction de ces facteurs ou pour éprouver la SOA sur une toute autre problématique. Tous ces facteurs demandent un apport considérable de données pour pouvoir être considérés et surtout pour que nous soyons en mesure de valider les résultats obtenus. Il est donc essentiel de continuer à travailler avec les biologistes pour pouvoir apporter ces améliorations.

Un autre aspect de l'évolution que nous voulons donner au système de monitoring, réside dans l'augmentation de son degré d'analyse. Pour ce faire, nous avons soulevé des pistes de travail notamment du côté des méthodes d'analyse factorielle (ACP, AFC, etc...). L'intégration de telles techniques dans l'outil d'aide à la décision autoriserait une seconde analyse (ou une analyse parallèle) qui viserait à structurer et à simplifier les données issues de plusieurs facteurs, sans privilégier l'une d'entre elles en particulier. Cela permettrait d'apporter un complément d'information qui améliorerait l'élaboration des scénarii obtenus lors des rétroactions sur le système et préciserait l'importance que prend chaque facteur dans la dissémination du parasite.

De plus, il semble intéressant de ne pas rester cantonné au domaine de la biologie mais de montrer l'utilité d'un tel procédé sur d'autres applications développées dans des domaines variés. Nous avons vu dans ce mémoire plusieurs exemples de systèmes pouvant être qualifiés de complexes ou encore de domaines d'application des SMA représentant des réalisations potentielles de SOA. Nous avons cité entre autres les problématiques liées au trafic routier ou aérien, l'évolution des marchés financiers, la répartition du travail dans les entreprises, la météorologie ou encore l'écologie. Ainsi nous souhaiterions montrer, si ce n'est l'universalité, tout au moins la large adaptabilité de la solution basée sur le concept de métaheuristique que nous avons développée.

# Bibliographie

---

AFSSA 1: Derouin, f., Eliazewicz, M., Pouillot, R., & Roze, S. (2002). *Rapport sur les Infections à Protozoaires liées aux Aliments et à l'Eau: Evaluation Scientifique des Risques Associés à Cryptosporidium sp.* Rapport AFSSA.

AFSSA 2: Derouin, F., Beaudou, P., Pouillot, R., & Roze, S. (2002). *Evaluation Quantitative du Risque Sanitaire lié à la présence de Cryptosporidium sp. dans l'Eau Distribuée.* Rapport AFSSA.

Aquasource, & Degrémont. (2006). *Les principes de l'ultrafiltration.* Récupéré sur [http://www.aquasource-membrane.com/FR\\_ultrafiltration.htm](http://www.aquasource-membrane.com/FR_ultrafiltration.htm)

Arkin, R. C. (1992). "Cooperation without communication: Multiagent schema-based robot navigation". *Journal of Robotic Systems* , 9 (3), 351.

Atkins, C. (1991). *Modèles à compartiments multiples pour les systèmes biologiques.* Paris: Dunod.

Atlas, S. (1993). Computer Simulation of alternative sampling Strategies to estimate Risk of Infection from Cryptosporidium. *Comp. Biol. Med.* , Vol. 23 (n°4), 283-294.

Augusto, V., & Xie, X. (14-16 septembre 2006). Modélisation et analyse de flux par la simulation en milieu hospitalier : l'état de l'art. *Actes de la conférence GISEH 2006.*

Balci, O. (1994). *Validation Verification and Testing Techniques Throughout The Life Cycle of a Simulation Study.* Annals of operation Research.

Banos, A., Godara, A., & Lassarre, S. (2005). Simulating pedestrians and cars behaviours in a virtual city : an agent-based approach. *European Conference on Complex Systems*, (p. 4). Paris.

Barel, Y. (1989). *Le Paradoxe et le Système* (éd. Deuxième Edition). Editions Presses Universitaires de Grenoble.

- Bateson, G. (1980). *Vers une Ecologie de l'Esprit*. Paris: Seuil.
- Beckers, R., Deneubourgh, J.-L., Goss, S., & Pasteels, J. M. (1990). Collective decision making through food recruitment. *Ins. Soc.* , 37, 258-267.
- Bienenstock, E., Fogelman-Soulié, F., & Weisbuch, G. (1988). *Disordered Systems and Biological Organization*. NATO ASI Series, Springer Verlag.
- Bonabeau, E., & Theraulaz, G. (1994). *Intelligence Collective*. Paris: Hermès.
- Bonabeau, E., & Theraulaz, G. (1993). Vie Artificielle et sciences du vivant. *1er Congrès Biennal de l'Association Française des Sciences et Technologies de l'Information et des Systèmes, AFCET*, (pp. 167-183).
- Bounds, D. G. (1987). New Optimization Methods from Physics and Biology. *Nature* , vol. 329, 215-219.
- Bouron, T. (1992). *Structure de communication et d'organisation pour la coopération dans un univers multi-agents*. Thèse d'université: Université Pierre et Marie Curie (Paris6).
- Bousquet, F., Le Page, C., & Müller, J.-P. (Assise 2002 GDRI3). *Modélisation et Simulation Muti-agents*. CIRAD/CNRS.
- Braffort, P. (1968). *L'Intelligence Artificielle: La Science Vivante*. Paris: Presse Universitaire de France.
- Brasseur, P., Lemeteil, D., & Mallet, E. (1987). Le cryptosporidiose chez l'enfant immunocompétent. *La presse médicale* , 16, 177.
- Breckling, B., & Müller, F. (1994). *State-of-the-art in Ecological Modelling* (Vol. 75). Amsterdam, Netherlands: Elsevier Pub.
- Bretagne, S., Jacovella, J., Breuil, J., Guillot, F., Liance, M., & Houin, R. (1990). Cryptosporidiosis in children: epidemics and sporadic cases. *Ann Pediatr* , 37, 381-386.

Bretagne, S., Jacovella, J., Breuil, J., Guillot, F., Liance, M., & Houin, R. (1990). Cryptosporidiosis in children: epidemics and sporadic cases. *Ann Pediatr* , 37, 381-386.

Brown, D., & Rothery, P. (1993). *Models in Biology: Mathematics, Statistics and Computing*. New-York, USA: Wiley,Liss.

Camazine, S. (1991). "Self-organizing pattern formation on the combs of honey bee colonies". *Behavioral Ecology and Sociobiology* , 28, 61-76.

Camazine, S., & Sneyd, J. (1991). "A model of collective nectar source selection by honey bees: self-organization through simple rules". *J. Theor. Biol.* , 149, 547-571.

Camazine, S., Deneubourg, J.-L., Franks, N., Sneyd, J., Bonabeau, E., & Theraulaz, G. (2001). *Self-Organization in Biological Systems*. Princeton University Press.

Capra, F. (2003). *La Toile de la vie : Une nouvelle interprétation scientifique des systèmes vivants*. Editions du Rocher.

Casemore, D. P. (1993). Is human cryptosporidiosis a zoonotic disease? *Lancet* , 342, 312.

Cellier, F. E. (1991). *Continuous System Modeling*. Springer Verlag.

Chappell, C. L., Okhuysen, P. C., Sterling, C. R., Wang, C., Jakubowski, W., & Dupont, H. L. (1999). Infectivity of *Cryptosporidium parvum* in healthy adults with pre-existing anti-*C. parvum* serum immunoglobulin G. *Am J Trop Med Hyg* , 60, 157-164.

Chatellier, V., Colson, F., Guesdon, J. C., Kempf, M., Legendre, J., & Perrot, C. (1997). La diversité des systèmes d'élevage bovin en France et leur contribution à la production de viande bovine. *INRA Prod. Anim.* , 10, 227-240.

Chauvin, P. (2002, avril 26). Lutte contre les mouches: Agir tôt, dès le stade larvaire. (A. n. Hebdomadaire N° 2453 du 26 Avril au 3 Mai 2002, Éd.) *Paysan Breton Hebdo: Techniques* .

Chen, L. S. (1988). *Mathematical Models and Methods in Ecology*. Beijing: Science Press.

Chen, L. S., & Chen, J. (1993). *Nonlinear Dynamical System in Biology*. Beijing: Science Press.

Coquillard, P., & Hill R. C., D. (1997). *Modélisation et Simulation d'Ecosystèmes: des Modèles Déterministes aux Simulations à Evénements Discrets*. Paris: Masson.

Crozier, M., & Friedberg, E. (1977). *L'Acteur et le Système*. Paris: Edition du Seuil.

Datry, A. (1995). Cryptosporidioses, coccidioses et blastocystose. *Traité de parasitologie médicale*, 18, 287-291.

Davis, R., & Smith, R. J. (1983). Negotiation as a Metaphor for Distributed Problem Solving. *Artificial Intelligence*, 20 (1), 63-109.

De Rosnay, J. (1975). *Le Macroscopie, vers une Vision Globale*. Paris: Edition du Seuil.

De Rosnay, J. (1995). *L'homme Symbiotique*. Paris: Edition du Seuil.

Delattre, P. (1971). *Système, Structure, Fonction, Evolution*. Paris: Maloine-Doin.

Demailly, A., Le moigne, J.-L., & Simon, H. A. (1986). *Sciences de l'Intelligence, Sciences de l'Artificiel*. Lyon: Presse Universitaire de Lyon.

Deneubourgh, J.-L. A. (1976). *Modèle théorique de la division du travail dans les sociétés d'insectes* (Vol. 5ème série, Tome LXII). Académie Royale de Belgique: Bulletin de la classe des sciences.

Deneubourgh, J.-L. (1977). Application de l'ordre par fluctuation à la description de certaines étapes de la construction du nid chez les termites. *Ins. Soc.*, 24, 117-130.

Deneubourgh, J.-L. (1993). Self-organisation and Life: From Simple Rules to Global Complexity. *Proceedings of the Second European Conference on Artificial Life*. Brussel: ULB.

Deneubourgh, J.-L., & Goss, S. (1989). Collective patterns and decision making. *Ethology, Ecology & Evolutino*, 1, 295-311.

Deneubourgh, J.-L., & Goss, S. (1990). Collective Patterns and Decision Making. *Ecology, Ethology and Evolution* , 1, 295-311.

Deneubourgh, J.-L., Goss, S., Beckers, R., & Sandini, G. (1991). *Collectively self-solving problems*. In 'Self-Organization, Emergent Properties and Learning', ed. A. Babloyantz, Plenum .

Deneubourgh, J.-L., Goss, S., Sandini, G., Ferrari, F., & Dario, P. (1990). "Self-organizing collection and transport of object in unpredictable environments". *Proc. Japan-USA Symposium on Flexible Automation*.

Detrain, C., Deneubourgh, J. L., & Pasteels, J. M. (1999). *Information Processing in Social Insects*. Belgium: Université Libre de Bruxelles.

Dréo, J., Petrowski, A., Taillard, E., & Siarry, P. (2006). *Metaheuristics for Hard Optimization Methods and Case Studies*. Springer: Hardcover.

Drogoul, A. (1994). *De la Simulation Multi-Agents à la Résolution Collective de Problèmes*. Thèse de l'Université de Paris VI.

Drogoul, A., Ferber, J., Corbara, B., & Fresneau, D. (1992). "A Behavioral Simulation Model for the Study of Emergent Social Structures". In: *Varela F.J. & Bougine P., Edits. Toward a Practice of Autonomous Systems, Proceedings of the First European Conference on Artificial Life* (pp. 161-170). Cambridge: MIT Press.

Drogoul, A., Vanbergue, D., & Meurisse, T. (2003). "Simulation Orientée Agent: où sont les agents ?". *Actes des Journées de Rochebrune, Rencontres interdisciplinaires sur les systèmes complexes naturels et artificiels*. Megève, France.

Dubois, F. (2002). *Modélisation Mathématique de l'Evolution: Du continu Classique au Discret Quantique*. Communication AFSCET au Moulin d'Andé.

Dumond, B., & Hill, D. R. (2001). Multi-agent simulation of group foraging insheep: effects of spatial memory, conspecific attraction and plot size. *Ecol. Model.* , 141, 201-215.

Dumont, B., & Hill, D. R. (2003). Spatially explicit models of group foraging by herbivores: what can Agent-Based Models offer. *Anim. Res.* , 53, 419-428.

Dumoulin, A., Guyot, K., Lelièvre, E., Dei-Cas, E., & Cailliez, J. C. (2000). Cryptosporidium et faune sauvage : un risque pour l'homme. *Parasite* .

Dupont, D., Kökösy, A.-M., Biela, P., & Saadane, A. (2002). Vie Artificielle: Application à la Résolution de Problèmes Complexes. *Techniques de l'Ingénieur* (Article RE1).

DuPont, H. L., Chapell, C. L., Sterling, C. R., Okhuysen, P. C., Rose, J. B., & Jakubowski, W. (1995). *The Infectivity of Cryptosporidium parvum in Healthy Volunteers*. *N Engl J Med*, 332, 855-859.

Dupuy, J.-P. (1979). *L'Enfer des Chose*. Paris: Edition du Seuil.

Dupuy, J.-P. (1982). *Ordre et Désordre. Enquête sur un Nouveau Paradigme*. Paris: Edition du Seuil.

Durand, D. (2004 9ème édition). *"La Systémique"*. P.U.F. Que Sais-je?

Durfee, E. H., Lesser, V. R., & Corkill, D. D. (1987). Cooperation through communication in a distributed problem solving network. (M. Huhns, Éd.) *Distributed Artificial Intelligence* .

Emerson, A. E. (1950). Biological sociology. *J. Sci. Lab.* , 36, 146-155.

Erceau, J., & Ferber, J. (1991). L'intelligence artificielle distribuée. *La Recherche* (n°233), 750-758.

Ernest, J. A., Blagburn, B. L., Lindsay, D. S., & Current, W. L. (1986). Infection dynamics of *Cryptosporidium parvum* (Apicomplexa: Cryptosporiidae) in neonatal mice (*Mus musculus*). *J Parasitol* , 72, 796-800.

Ewel, K. C. (1989). *Learning to Simulate Ecological Models on Microcomputer. Ecological Modelling* (Vol. 47).

Ferber, J. (1994). Cooperation Réactive et Emergence. *Intellectica* (n°19), 19-52.

Ferber, J. (1995). *Les Systèmes Multi-Agents: Vers une Intelligence Collective*. Paris: InterEdition.

Ferber, J. (1983). *Mering: un Langage d'Acteur pour la Représentation et la Manipulation de Connaissances*. Paris: These de Docteur Ingénieur. Université Pierre et Marie Curie.

Ferber, J. (1989). *Objets et agents : une etude des structures de représentation des communications en intelligence artificielle*. Paris: Thèse de Doctorat d'Etat, Université Pierre et Marie Curie.

Ferber, J. (1996). *Technologie Multiagents*. Memento n°8 France Télécom, Les Interfaces Intelligentes et les Images.

Fishwick, P. (1995). *Simulation Model Design and Execution*. Prentice Hall.

Flanigan, T., Whalen, C., Turner, J., Soave, R., Toerner, J., Havlir, D., et al. (1992). Cryptosporidium infection and CD4 counts. *Ann Intern Med* , 116, 840-842.

Follet, A. (2005). *Mise en Evidence du Role des Insectes (Dipterae) dans le Transport de Cryptosporidium parvum*. Lille: Thèse pour l'Obtention du Doctorat des Sciences de l'Université de Lille II, Discipline: Parasitologie.

Forrester, J. W. (1980). *Principes des Systèmes*. (P. Sylvestre-Baron, Trad.) Lyon: Presse Universitaire de Lyon.

Fougères, A.-J. (2003). Une Architecture Cognitive d'agents communicants dans des systèmes d'information complexes. *Secondes Journées Francophones MODÈLES FORMELS de l'INTERACTION*. Lille.

Freire-Santos, F., Vergara-Castiblanco, C. A., Tojo-Rodriguez, J. L., Santamarina-Fernandez, T., & Ares-Mazas, E. (1998). Cryptosporidium parvum: an attempt at experimental infection in rainbow trout *Oncorhynchus mykiss*. *J Parasitol* , 84, 935-938.

Frontier, S. (1977). *Réflexions pour une Théorie des Ecosystèmes* (Vol. 8). Bull. Ecol.

Frontier, S., & Pichod-Viale, D. (1995). *Ecosystèmes: Structures - Fonctionnement Evolution* (éd. Deuxième Edition). Paris: Masson.

Frost, F. J., Muller, T., Craun, G. F., Lockwood, W. B., & Calderon, R. L. (2002). Serological evidence of endemic waterborne *Cryptosporidium* infections. *Ann Epidemiol* (12), 222-227.

Gervet, J. (1968). Interactions entre Individus et Phénomène Social. *Nerth. J. Zool.* , 18 (2), 205-252.

Gilbert, N., & Troitzsch, K. G. (1999). *Simulation for the Social Scientist*. Open University Press.

Giles, M., Webster, K. A., Marshall, J. A., Catchpole, J., & Goddard, T. M. (2001). *Vet Rec. Experimental infection of a lamb with Cryptosporidium parvum genotype 1* , 149, 523-525.

Gleick, J. (1989). *La Théorie du Chaos, vers une nouvelle science*. Paris: Flammarion.

Glover, F. W., & Kochenberger, G. A. (2003). *Handbook of Metaheuristics*. Kluwer Academic Publishers, International series in operations research and management science : Boston Hardbound.

Goel, N. S., & Richter-Dyn, N. (1974). *Stochastic Models in Biology*. New-York: Academic Press.

Gordon, G. (1978). *System Simulation*. Englewood Cliffs, New Jersey, USA: Prentice-Hall Inc.

Gould, S. (1984). *Darwin et les Grandes Enigmes de la Vie*. Paris: Edition du Seuil.

Graczyk, T. K., & Cranfield, M. R. (1998). Experimental transmission of *Cryptosporidium* oocyst isolates from mammals, birds and reptiles to captive snakes. *Vet Res* , 29, 187-195.

Graczyk, T. K., Cranfield, M. R., Fayer, R., & Bixler, H. (1999 a). House flies (*Musca domestica*) as transport hosts of *Cryptosporidium parvum*. *Am J Trop Med Hyg* , 61, 500-504.

Graczyk, T. K., Fayer, R., & Cranfield, M. R. (1996). *Cryptosporidium parvum* is not transmissible to fish, amphibians, or reptiles. *J Parasitol* , 82, 748-751.

Graczyk, T. K., Fayer, R., Cranfield, M. R., Mhangami-Ruwende, B., Knight, R., Trout, J. M., et al. (1999 b). Filth flies are transport hosts of *Cryptosporidium parvum*. *Emerg Infect Dis* , 5, 726-727.

Graczyk, T. K., Fayer, R., Knight, R., Mhangami-Ruwende, B., Trout, J. M., Da Silva, A. J., et al. (2000). Mechanical transport and transmission of *Cryptosporidium parvum* oocysts by wild filth flies. *Am J Trop Med Hyg* , 63, 178-183.

Graczyk, T. K., Grimes, B. H., Knight, R., Da Silva, A. J., Pieniazek, N. J., & Veal, D. A. (2003). Detection of *Cryptosporidium parvum* and *Giardia lamblia* carried by synanthropic flies by combined fluorescent in situ hybridization and a monoclonal antibody. *Am J Trop Med Hyg* , 68, 228-232.

Graczyk, T. K., Knight, R., Gilman, R. H., & Cranfield, M. R. (2001). The role of non-biting flies in the epidemiology of human infectious diseases. *Microbes Infect.* , 3, 231-235.

Grassé, P. P. (1958). L'effet de Groupe sur l'Animal et sur l'Homme. *J. Psychol. Norm. Pathol* , 55 (2), 129-150.

Grassé, P. P. (1944). Les Insectes et Leur Univers. *Coll. Conf. Palais de la Découverte* , (pp. 1-21).

Grassé, P. P. (1963). Les phénomènes Sociaux chez les Animaux. *Cahier de l'institut de Science Economique Appliquée* , Suppl. 139, V, 67-123.

Grassé, P. P. (1960). Les Régulations automatiques du comportement collectif des insectes sociaux et la stimerge. *J. Psycho. Norm. Pathol.* , 57 (1), 1-10.

Grassé, P. P. (1946). Société Animale et Effet de Groupe. *Experimentia* , 2, 77-82.

Grassé, P. P. (1984). *Termitologia* (Vol. Tome II). Paris: Masson.

Guyot, K., Follet-Dumoulin, A., Lelievre, E., Sarfati, C., Rabodonirina, M., Nevez, G., et al. (2001). Molecular characterization of *Cryptosporidium* isolates obtained from humans in France. *J Clin Microbiol* (39), 3472-3480.

Harp, J. A., Woodmansee, D. B., & Moon, H. W. (1990). Resistance of calves to *Cryptosporidium parvum*: effects of age and previous exposure. *Infect Immun* , 58, 2237-2240.

Herault, J., & Jutten, C. (1994). *Réseaux Neuronaux et Traitement du Signal*. Paris: Hermès.

Heudin, J. C. (1994). *La Vie Artificielle*. Paris: Hermès.

Heyworth, M. F. (1992). Immunology of *Giardia* and *Cryptosporidium* infections. *J Infect Dis* , 166, 465-472.

Hill R. C., D. (1993). *Analyse Orientée-Objet et Modélisation par Simulation*. Addison-Wesley.

Hill R. C., D., Mazel, C., Kellert, p., & Coquillard, P. (Janvier 1996). Modèles dynamiques d'écosystèmes et simulation à événements discrets. *Actes du Colloque CNRS tendances nouvelles en modélisation pour l'environnement*, (pp. 117-123). Paris.

Holten-Andersen, W., Gerstoft, J., Henriksen, S. A., & Pedersen, N. S. (1984). Prevalence of *Cryptosporidium* among patients with acute enteric infection. *J Infect* , 9, 277-282.

Huston, M., DeAngelis, D., & Post, W. (1988). New Computer Models Unify Ecological Theory. Computer Simulation shows that many ecological patterns can be explained by interactions. *BioScience* , Vol. 38 (n°10), p. 682-691.

Isaacs, D. (1985). *Cryptosporidium* and diarrhoea. *Arch Dis* , 60, 608-609.

Jarras, I., & Chaib-draa, B. (2002). *Aperçu sur les Systèmes Multiagents*. Montréal: Centre Interuniversitaire de Recherche en Analyse des Organisations (CIRANO).

Jean, M. R. (2002). Emergence et SMA. *Journée Francophone IAD et SMA*. Nice: Hermès.

Jorgensen, S. E. (1994). *Fundamentals of Ecological Modelling*. Amsterdam, Netherland: Elsevier.

Joubert, P., & Hersent, B. (2005). Réactualiser le modèle d'économie politique par l'outil systémique. *Congrès UES*. Paris: "Systémique et Société".

Konkle, D. M., Nelson, K. M., & Lunn, D. P. (1997). Nosocomial transmission of Cryptosporidium in a veterinary hospital. *J Vet Intern Med*, 11, 340-343.

Koopman, J., Jacquez, G., & Chicks, S. (2001). New Data and Tools for integrating Discrete and Continuous population Modeling Strategies. *Annals of the New-York Academy of Sciences* (n°954), 268-294.

Kube, R., & Zhang, H. (1993). Collective Robotics : From Social Insects to Robots. *Adaptive Behavior* 2 , 189.

Labrani, O., & Müller, J.-P. (1997). Conception de Comportements Collectifs: l'Etape d'Analyse. *Journée Francophone IAD et SMA*. Nice: Hermès.

Labidi, S., & Lejouad, W. (1993). *De l'Intelligence Artificielle Distribuée aux Systèmes Multi-Agents* (Vol. 2004). Publicatino INRIA.

Langton, C. G. (1987). Récupéré sur International Society of Artificial Life: [www.alife.org](http://www.alife.org)

Laughlin, R. B. (2005). *Un Univers Différent*. Paris: Fayard, Le temps de sciences.

Laurent, M. (1999). *La Puissance du vivant. Dynamique des systèmes biologiques*. Hermann.

Le Moigne, J.-L. (1990 a). "*Système (La Science des...)*". Article de l'Encyclopedia Universalis, Edition de 1990.

Le Moigne, J.-L. (1990 b). *La modélisation de Systèmes Complexes*. Paris: AFCET Systèmes, Dunod.

Le Moigne, J.-L. (1994). *La Théorie du Système Général, Théorie de la Modélisation* (éd. 4ème Edition Augmentée). Paris: P.U.F.

Le Moigne, J.-L. (1974). *Les Systèmes de Décision dans les Organisations*. Paris: P.U.F.

Lensink, J., & Leruste, H. (2006). *L'observation du troupeau bovin*. La France agricole.

Lesourne, J. (1981 a). *La Notion de Système dans les Sciences Contemporaines*. Aix-en-Provence: Edition de la Librairie de l'Université.

Lesourne, J. (1981 b). *Les Mille Sentiers de l'Avenir*. Seghers.

Lesourne, J. (1976). *Les Systèmes du Destin*. Paris: Dalloz, Economie.

Lindsay, D. S., Blagburn, B. L., & Hoerr, F. J. (1987). Experimentally induced infections in turkeys with *Cryptosporidium baileyi* isolated from chickens. *Am J Vet Res* , 48, 104-108.

Lindsay, D. S., Blagburn, B. L., & Sundermann, C. A. (1986). Host specificity of *Cryptosporidium* sp. isolated from chickens. *J Parasitol* (72), 565-568.

Lindsay, D. S., Blagburn, B. L., Sundermann, C. A., & Hoerr, F. J. (1989). Experimental infections in domestic ducks with *Cryptosporidium baileyi* isolated from chickens. *Avian Dis* , 33, 69-73.

Mac Kenzie, W. R., Hoxie, N. J., Proctor, M. E., A, G. M., Peterson, D. E., Kazmierczak, J. J., et al. (1994). A massive outbreak in Milwaukee of *Cryptosporidium* infection transmitted through the public water supply. *N Engl J Med* , 331, 161-167.

Mandiau, R., & Grislin-Le Strugeon, E. (2002). Systèmes Multiagents. *Techniques de l'Ingénieur* (Article S7216).

Maros, I. (2002). *Computational Techniques of the Simplex Method*. Kluwer Academic Publishers.

Mata, L., Bolanos, H., Pizarro, D., & Vives, M. (1984). Cryptosporidiosis in children from some highland Costa Rican rural and urban areas. *Am J Trop Med Hyg*, 33, 24-29.

Mathison, B. A., & Ditrich, O. (1999). The fate of *Cryptosporidium parvum* oocysts ingested by dung beetles and their possible role in the dissemination of cryptosporidiosis. *J Parasitol*, 85, 678-681.

Maturana, H., & Valera, F. (1980). *Autopoiesis and cognition : the realization of the living*. Dordrecht: Reidel.

Maturana, H., & Valera, F. (1994). *L'arbre de la connaissance : Racines biologiques de la compréhension humaine*. Paris: Addison Wesley.

Mélèse, J. (1990). *Approche Systémique des Organisations*. Paris: Hommes et Techniques.

*Métaheuristique*. (2007, avril 11). Consulté le juin 2007, sur Wikipédia (fr): <http://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9taheuristique>

Montandon, P. -E. (1998). Incidents dus à *Cryptosporidium* dans les systèmes d'adduction d'eau potable. (S. V.-u. Wasserfaches, Éd.) *GWA Gas Wasser Abwasser*, 78 (1), 18-27.

Morgan, U. M., Xiao, L., Fayer, R., Lal, A. A., & Thompson, R. C. (1999). Variation in *Cryptosporidium*: towards a taxonomic revision of the genus. *Int J Parasitol*, 29, 1733-1751.

Morin, E. (1990). *Introduction à la Pensée Complexe*. Paris: ESF Editeur.

Morin, E. (1977). *La Méthode* (Vol. Tome I, La Nature de la Nature). Paris: Edition du Seuil.

Mosier, D. A., & Oberst, R. D. (2000). Cryptosporidiosis. A global challenge. *Ann N Y Acad Sci* , 916, 102-111.

Müller, J.-P. (2002). *Des systèmes Autonomes aux systèmes multi-agents: Interactions, émergence et systèmes complexes*. Ecole Doctorale Informatique, Structure, Systèmes, Université de Montpellier II: Habilitation à Diriger les Recherches en Informatique (27ème section).

Müller, J.-P. (1998 a). La Relation de Représentation comme Attribution. *Journée Francophone IAD et SMA*. Pont à Mousson: Hermès.

Müller, J.-P. (1997). Un Modèle Interactionniste de l'Interprétation: Le Cas de la Perception de l'espace. *Journée Francophone IAD et SMA*. Nice: Hermès.

Müller, J.-P. (1998 b). Vers une Méthodologie de Conception de Systèmes Multi-Agents de Résolution de problème par Emergence. *Journée Francophone IAD et SMA*. Pont à Mousson: Hermès.

Naciri, M., Lefay, M. P., Mancassola, R., Poirier, P., & Chermette, R. (1999). Role of *Cryptosporidium parvum* as a pathogen in neonatal diarrhoea complex in suckling and dairy calves in France. *Vet Parasitol* , 85, 245-257.

Nguyen-Duc, M., Duong, V., & Drogoul, A. (2004). Agent-based modeling and experimentation for real-time collaborative decision making in air traffic management. *the 24th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS'04)*. Yokohama, Japan.

Noureddine, M. (2005). Système d'aide au pilotage des flux de production par les systèmes multi-agents. *Département d'Informatique, Faculté des Sciences, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran (USTO)* .

O'Donoghue, P. J., Tham, V. L., de Saram, W. G., Paull, K. L., & McDermott, S. (1987). *Cryptosporidium* infections in birds and mammals and attempted cross-transmission studies. *Vet Parasitol* , 26, 1-11.

Okhuysen, P. C., Chappell, C. L., Crabb, J. H., Sterling, C. R., & DuPont, H. L. (1999). Virulence of three distinct *Cryptosporidium parvum* isolates for healthy adults. *J Infect Dis*, *180*, 1275-1281.

Ören, T. I., & Zeigler, B. P. (1979). Concepts for Advanced Simulation Methodologies. *Simulation*, Vol. 32 (n°3), p. 69-82.

Palm, W. J. (2004). *System Dynamics*. Mc Graw Hill.

Pancieria, R. J., Thomassen, R. W., & Garner, F. M. (1971). Cryptosporidial infection in calf. *Vet Pathol*, *8*, 479.

Parlasek, I. (1983). Experimental infection of cat and chicken with *Cryptosporidium* sp. oocysts isolated from a calf. *Folia Parasitol (Praha)*, *30*, 121-122.

Passera, L. (2006). *La véritable histoire des fourmis*. Fayard.

Pavé, A. (1994). *Modélisation en Biologie et Ecologie*. Lyon: Aléas.

Pedraza-Diaz, S., Amar, C., & McLauchlin, J. (2000). The identification and characterisation of an unusual genotype of *Cryptosporidium* from human faeces as *Cryptosporidium meleagridis*. *FEMS Microbiol Lett*, *189*, 189-194.

Perelson, A. S. (1990). Theoretical Immunology. (Addison-Wesley, Éd.) *In Lectures in Complex Systems - SFI Studies in Sciences of Complexity, Lect. Vol. II, Edited by Erica Jen*, 465-500.

Perez, J.-C. (1989). *De Nouvelles Voies vers l'Intelligence Artificielle: Pluri-Disciplinarité, Auto-Organisation, Réseaux Neuronaux*. Paris: Masson.

Peters, R. (1979). *The behaviour and ecology of wolves*. (E. Klinghammer, Éd.) New York: Garland.

Polya, G. (1958). *Les Mathématiques et le Raisonnement Plausible*. Paris: Gauthier-Villars.

Popp, K., & Schiehlen, W. (2005). *Ground Vehicle Dynamics: A System Dynamics Approach*. Springer-Verlag.

Pouillot, R., Beaudreau, P., Denis, J. B., & Derouin, F. (2004). A quantitative risk assessment of waterborne cryptosporidiosis in France using second-order Monte Carlo simulation. *Risk Anal*, 24, 1-17.

Pozio, E., Rezza, G., Boschini, A., Pezzotti, P., Tamburrini, A., Rossi, P., et al. (1997). Clinical cryptosporidiosis and human immunodeficiency virus (HIV)-induced immunosuppression: findings from a longitudinal study of HIV positive and HIV negative former injection drug users. *J Infect Dis*, 176, 969-975.

Preiser, G., Preiser, L., & Madeo, L. (2003). An outbreak of cryptosporidiosis among veterinary science students who work with calves. *J Am Coll Health*, 51, 213-215.

Prigogine, I. (1996). *La fin des certitudes: Temps, chaos et les lois de la nature*. Paris: Odile Jacob.

Rennard, J.-P. (2000). *Handbook of Research on Nature Inspired Computing for Economics and Management*. Grenoble, France: Grenoble Graduate School of Business.

Rennard, J.-P. (2006). *Réseaux neuronaux et modèle objet*. Vuibert.

Rennard, J.-P. (2002). *Vie Artificielle: Où la biologie rencontre l'informatique*. Vuibert.

Renshaw, E. (1995). *Modelling Biological populations in Space and time*. Cambridge University Press.

Ricordel, P.-M. (2001). *Programmation Orientée Multi-Agents: Développement et Déploiement de Systèmes Multi-agents Voyelles*. Grenoble: Thèse de l'Institut Nationale Polytechnique de Grenoble.

Rose, J. B., & Slifko, T. R. (1999). Giardia, Cryptosporidium, and Cyclospora and their impact on foods: a review. *J Food Prot*, 62, 1059-1070.

Sargent, R. G. (1984). a Tutorial on Verification and validation of simulation models. *Winter Simulation Conference*, (pp. 115-121).

Sargent, R. G. (1979). Validation of Simulation Models. *Proc. Winter Simulation Conf. San Diego*, (pp. 479-503). CA.

Schneider, D. K. (1994). *Modélisation de la démarche du décideur politique dans la perspective de l'intelligence artificielle*. Genève: Thèse de l'Université de Genève, Faculté des Sciences économiques et sociales, Département de science politique.

Sera, R., Andreta, M., Copiani, M., & Zanarini, G. (1986). *Introduction to the physics of complex systems. The mesoscopic approach to fluctuations, non linearity and self-organization*. Pergamon Press.

Simon, H. A. (1990). *Sciences des Systèmes, Sciences de l'Artificiel*. (J.-L. Le Moigne, Trad.) Paris: Dunod.

Singh, K., & Fujimura, K. (1993). Map making by cooperating mobile robots. *Proceedings of 1993 International Conference on Robotics and Automation*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press.

Steels, L. (1994). The artificial life roots of the artificial intelligence. (MITPress, Éd.) *Artificial Intelligence*, 1, 75-110.

Tamzalit, D. (2000). *GENOME: un modèle pour la simulation d'émergence de structures d'objets*. Nantes: Thèse de l'Université de Nantes.

Theraulaz, G., & Gervet, J. (1993). Principe Fonctionnel de l'Intelligence en Essaim et Modèles de Computation Collective chez les Insectes Sociaux. *Deuxième Congrès Européen de Systémique*, (pp. 880-889). Prague.

Thom, R. (1983). *Paraboles et Catastrophe*. Paris: Flammarion.

Turing, A., & Girard, R. (1995). *La Machine de Turing*. Paris: Edition du Seuil.

Tzipori, S., Angus, K. W., Campbell, I., & Gray, E. W. (1982). Experimental infection of lambs with *Cryptosporidium* isolated from a human patient with diarrhoea. *Gut*, *23*, 71-74.

Tzipori, S., Angus, K. W., Gray, E. W., Campbell, I., & Allan, F. (1981 a). Diarrhea in lambs experimentally infected with *Cryptosporidium* isolated from calves. *Am J Vet Res*, *42*, 1400-1404.

Tzipori, S., McCartney, E., Lawson, G. H., Rowland, A. C., & Campbell, I. (1981 b). Experimental infection of piglets with *Cryptosporidium*. *Res Vet Sci*, *31*, 358-368.

Tzipori, S., Smith, M., Birch, C., Barnes, G., & Bishop, R. (1983). Cryptosporidiosis in hospital patients with gastroenteritis. *Am J Trop Med Hyg*, *32*, 931-934.

U.N.U.-IDATE, U. d. (1986). *Sciences et Pratique de la Compléxité*. Paris: La Documentation Française.

Ulam, S. (1983). *Adventures of a Mathematician*. New-York: Charles Scribner's Sons.

Vally, J.-D., & Courdie, R. (2000). *Uniformisation des Mécanismes de Conception de SMA*. Saint-Denis, La Réunion, France: MAS2 IREMIA, Université de la Réunion.

Vernadat, F. (1999). Techniques de Modélisation en Entreprise : Application aux Processus Opérationnels. *Economica*.

Von Bertalanffy, L. (1968). *General System Theory, Foundations, Development, Applications*. New-York: George Braziller.

Von Bertalanffy, L. (1961). *Les Problèmes de la Vie, Essai sur la Pensée Biologique Moderne*. Paris: Gallimard.

Von Bertalanffy, L. (1987). *Théorie Générale des Systèmes*. Paris, France: Dunod.

Von Neumann, J. (1966 a). *Probabilistic logics and the synthesis of reliable organisms from unreliable components*. In *Collected Work V.*, Pergamon Press.

Von Neumann, J. (1966 b). *Theory of Self-Reproducing Automata*. University of Illinois Press.

Von Neumann, J., & Morgenstern, O. (2004). *Theory of Games and Economic Behavior, sixtieth-anniversary edition*. Princeton University Press.

Walliser, B. (1977). *Systèmes et Modèles, Introduction à l'Analyse de Systèmes*. Paris: Edition du Seuil.

Weir, S. C., Pokorny, N. J., Carreno, R. A., Trevors, J. T., & Lee, H. (2001). Improving the rate of infectivity of *Cryptosporidium parvum* oocysts in cell culture using centrifugation. *J Parasitol*, *87*, 1502-1504.

Wiener, N. (1ère Edition 1948, seconde 1961). *Cybernetics: or Control and Communication in the Animal and The Machine*. MIT Press.

Wilden, A. (1980). *System and Structure. Essays on Communication and Exchange* (éd. 2ème Edition revue, corrigée et complétée). New-York: Tavistock.

Wolfram, S. (2002). *A New Kind of Science*. Wolfram Media .

Wolfram, S. (1986). *Theory and Applications of Cellular Automata*. World Scientific Publishing C°.

Woodridge, M. (2002). *An Introduction to MultiAgent Systems*. Chichester, England: John Wiley & Sons .

Xiao, L., Bern, C., Limor, J., Sulaiman, I., Roberts, J., Checkley, W., et al. (2001). Identification of 5 types of *Cryptosporidium* parasites in children in Lima, Peru. *J Infect Dis*, *183*, 492-497.

Xiao, L., Fayer, R., Ryan, U., & Upton, S. J. (2004). *Cryptosporidium* taxonomy: recent advances and implications for public health. *Clin Microbiol Rev*, *17*, 72-97.

Xiao, L., Morgan, U. M., Fayer, R., Thompson, R. C., & Lal, A. A. (2000). *Cryptosporidium* systematics and implications for public health. *Parasitol Today*, *16*, 287-292.

Yang, S., Benson, S. K., Du, C., & Healey, M. C. (2000). Infection of immunosuppressed C57BL/6N adult mice with a single oocyst of *Cryptosporidium parvum*. *J Parasitol*, *86*, 884-887.

Yatchinovsky, A. (2004). *"L'Approche Systémique pour Gérer l'Incertitude et la Complexité"*. ESF Editeur.

Zacklad, M., & Erceau, J. (1993). Coordination via l'Environnement vs Coordination via une Organisation. *Intelligence Collective, Journée de Rochebrune*.

Zeigler, B. P. (1976). *Theory of Modeling and Simulation*. New-York: Willey InterScience.

# Glossaire

---

Ce Glossaire est inspiré en partie du « Glossaire de la Systémique » proposé par le Centre Interfacultaire d'Etudes Systémiques (CIES) qui est un lieu de rencontre destiné aux étudiants, enseignants, chercheurs, praticiens ou toute autre personne intéressée par la science des systèmes et plus généralement, par une approche permettant d'appréhender les situations complexes et les systèmes en voie d'autonomisation, qui sont inaccessibles par l'approche réductionniste standard.

## **Autonomie**

(grec *auto* : soi et *nomos*: la loi.). Sens commun : possibilité de décider dont peut jouir un organisme (organisation sociale, politique ou économique, individu, etc.). En science des systèmes : propriété d'un système qui se donne lui-même sa propre loi.

## **Auto-organisation**

Processus d'émergence spontanée d'ordre dans un système, dû à des relations internes au système et/ou à des relations avec son environnement et à la manifestation de ces relations dans l'écoulement du temps. Augmente la complexité.

## **Autopoïèse**

(grec *auto* : soi-même, *poiësis* : production) Propriété d'un système qui se produit lui-même. Cette propriété est due à la présence d'une boucle fermée entre son organisation (réseau) logique et les processus physiques dont il est le siège.

## **Auto-référence**

Propriété d'un système qui est sa propre référence. Il y a référence possible lorsqu'on est en présence de deux niveaux logiques, un niveau et un méta-niveau. Exemple : le niveau des objets du monde et le méta-niveau du langage qui s'y réfère. Il y a hétéro-référence lorsque un mot (ou une phrase) se réfère à un objet (ou une situation) du monde, par exemple : une table. Il y a auto-référence lorsqu'un signe se réfère à lui-même. Exemple d'une phrase qui se réfère à elle-même : « Cette phrase est fausse ». Autres exemples de situations auto-référentielles, plus abstraites : l'autopoïèse, car l'organisation logique produit la structure physique qui la réalise logiquement et la régénère. L'autogenèse, car une identité en voie d'autonomisation intervient dans les règles de sa propre production, c'est-à-dire dans le dialogue autopoïétique entre son organisation logique et ses processus physiques. Certains concepts proches de l'ultime et du tout, ont un fort caractère auto-référentiel, par exemple: être, réalité, identité, existence, substance. Ils renvoient à eux-mêmes (miroir ontologique).

## **Bioinformatique**

On regroupe sous le terme de bioinformatique un champ de recherche multidisciplinaire où travaillent de concert biologistes, informaticiens, mathématiciens et physiciens, dans le but de résoudre un problème scientifique posé par la biologie. Tout comme l'informatique peut être considérée, suivant les situations, comme une science ou comme une technologie, le terme bioinformatique (par abus de langage) peut décrire toutes les applications informatiques résultant de ces recherches. Cela va de l'analyse du génome à la modélisation de l'évolution d'une population animale dans un environnement donné, en passant par la modélisation moléculaire, l'analyse d'image, le séquençage du génome, la reconstruction d'arbres phylogénétiques, etc.

## **Biologie Cellulaire**

La biologie cellulaire, ou cytologie, est une discipline de la biologie étudiant les cellules et leurs organites, les processus vitaux qui s'y déroulent ainsi que les mécanismes permettant leur survie sans oublier la caractéristique principale de la cellule vivante, à savoir, la mort, qui peut être programmée génétiquement (apoptose) ou être le résultat d'une agression (nécrose).

## **Biologie Moléculaire**

La biologie moléculaire est une discipline scientifique dont l'objet est la compréhension des mécanismes de fonctionnement de la cellule au niveau moléculaire. Le terme « biologie moléculaire » désigne également l'ensemble des techniques de manipulations d'acides nucléiques (ADN, ARN), appelées aussi techniques de génie génétique.

## **Contingent**

Ce qui peut être ou ne pas être. S'oppose à nécessaire. Un événement historique contingent aurait pu ne pas arriver, par opposition à une circonstance nécessaire, qui doit logiquement arriver.

## ***Cryptosporidium* sp.**

*Cryptosporidium* est un genre de protozoaires pathogènes parasite intestinal, de l'embranchement *Apicomplexa*, capables de provoquer des diarrhées appelées cryptosporidiose. Ils peuvent également causer des maladies sévères, y compris des pancréatites (inflammation du pancréas).

## **Cybernétique**

(N. Wiener, du gr. *Kybernetiki*: art du pilotage) Science du contrôle et de la communication chez les êtres vivants, les machines et, plus généralement, dans tous les systèmes, naturels ou construits. La cybernétique forme, avec la théorie générale des systèmes du biologiste L. von Bertalanffy, ce qu'on appelle souvent la première systémique qui est l'étude du fonctionnement des systèmes (et non de leur émergence, de leur transformation et de leur évolution). Une des notions les plus importantes de la cybernétique est la rétroaction.

## Déterminisme

Attitude épistémologique consistant à penser que l'état ultérieur d'un système est entièrement déterminé par son état présent, les mêmes causes produisant les mêmes effets. Un système peut être rigoureusement déterministe ou n'être déterminé que de façon probabiliste; dans ce dernier cas, l'état ultérieur n'est pas déterminé de façon précise, mais selon une certaine distribution de probabilité. En dynamique des systèmes non-linéaires, loin de l'équilibre, un système peut être déterministe (donc non probabiliste) et néanmoins être très rapidement imprédictible (grande sensibilité aux conditions initiales).

## Ecologie

L'écologie est l'étude des interactions des êtres vivants entre eux et avec leur milieu. L'écologie est l'une des sciences naturelles.

## Emergence

L'émergence est un phénomène que l'on trouve dans les domaines physiques, biologiques, écologiques, socio-économiques et autres systèmes dynamiques comportant un nombre important d'interactions. On peut définir l'émergence par deux caractéristiques : 1) l'ensemble fait plus que la somme de ses parties. Ceci signifie qu'on ne peut pas forcément prédire le comportement de l'ensemble par la seule analyse de ses parties. 2) l'ensemble adopte un comportement caractérisable sur lequel la connaissance détaillée de ses parties ne renseigne pas complètement. À partir d'un certain seuil critique de complexité, ces systèmes voient apparaître de nouvelles propriétés, dites *propriétés émergentes*. Celles-ci deviennent observables lorsqu'elles vont dans le sens d'une organisation nouvelle (voir aussi auto-organisation).

## Epistémologie

(grec *épistémé* : science et *logos* : étude). Science de la science. Théorie de la connaissance. Etude des présupposés d'une science.

## Equifinalité

L'équifinalité désigne un même état final qui peut être atteint à partir de différents états initiaux, à travers différentes voies et avec différents moyens. En d'autres termes, des mêmes effets peuvent avoir des causes différentes. C'est une sorte de « suite convergente ».

## Flux

Le mot flux (du latin *fluxus*, écoulement) désigne en général un ensemble d'éléments (informations / données, énergie, matière, ...) évoluant dans un sens commun.

## Génétique

La génétique (grec *genno* : donner naissance) est la science qui étudie les fonctions chimiques inhérentes à une espèce particulière de molécules appelée gène. Ce terme regroupe un nombre important de disciplines, la plupart associées à la biologie.

## Holisme

(grec *holos* : entier) Attitude épistémologique qui consiste à considérer qu'un système complexe est une entité qui possède des caractéristiques émergentes liées à sa totalité, propriétés qui ne sont pas réductibles à, et déductibles de celles de ses éléments.

## Immunologie

L'immunologie est l'étude du système immunitaire et de la réaction face aux organismes pathogènes. L'immunologie s'intéresse également aux maladies auto-immunes, aux allergies et au rejet des greffes. L'*immunodépression*, ou *immunodéficiance*, caractérise un état dans lequel une personne voit ses défenses immunitaires affaiblies. On distingue l'immunodéficiance d'origine génétique, ou *immunodéficiance innée* (dont un des cas extrêmes est représenté par les enfants-bulles), et l'*immunodéficiance acquise* (l'exemple le plus connu est celui du SIDA). D'une manière générale, l'immunodéficiance favorise le développement anormal d'organismes ordinairement non-pathogènes, responsables alors de maladies dites *opportunistes*.

## Informaticien

Précisément, le rôle de l'informaticien est en grande partie de transcrire en lignes de code le modèle de conception. Cependant, si la diversité des plates-formes et des langages lui montre l'étendue des possibilités que lui offre l'implémentation, elle le contraint également à mettre en place un modèle de transition entre l'implémentation et le modèle réalisé par le modélisateur. Ce modèle est appelé « modèle opérationnel » et revient à décrire le système virtuel en termes computationnels c'est-à-dire en envisageant les agents comme technique d'implémentation (comme les objets par exemple). Ce modèle permet et facilite par la suite la modification du code en fonction des aspirations et des contraintes de chacun. La réalisation de ce modèle est donc essentielle et précède la conception effective du système computationnel.

## Intelligence Artificielle (IA)

L'IA est contemporaine des premiers développements de la cybernétique. Elle s'intéresse à la conception de machines pouvant simuler la cognition humaine. L'IA a connu de nombreux succès dans des applications extrêmement variées et particulièrement dans la conception de systèmes experts ou de réseaux de neurones. Initialement, les ambitions de l'IA étaient particulièrement élevées. Cette discipline a pour ambition de créer des automates capables de traiter des problèmes très généraux comme la reconnaissance du langage, la traduction des langues naturelles ou la résolution universelle de problèmes. Il est donc question de modéliser le savoir-faire de l'expert. L'IA se diversifie donc dans de nombreuses voies.

## Intelligence Artificielle Distribuée (IAD)

L'intelligence artificielle distribuée est différente de l'IA par le fait qu'elle ne considère plus la modélisation du comportement intelligent d'une seule entité ou d'un groupe homogène. Elle considère le comportement collectif d'une collection d'entités, aux caractéristiques divers, misent en relation par des lois et des propriétés simples, afin de voir émerger les structures souhaitées.

## Interdisciplinaire

S'applique à des activités, des problèmes et des projets dépassant les capacités d'une seule discipline et qui impliquent donc des apports et des interactions de plusieurs disciplines. Alors que la pluridisciplinarité n'est que la juxtaposition de plusieurs disciplines établies, l'interdisciplinarité peut conduire à un dépassement des disciplines concernées et aboutir à des notions transdisciplinaires.

## Langage Formel

Dans de nombreux contextes (scientifique, légal, etc.) l'on désigne par langage formel un mode d'expression plus formalisé et plus précis (les deux n'allant pas nécessairement de pair) que le langage de tous les jours. En mathématiques, logique et informatique, un langage formel est formé : 1) d'un ensemble de mots obéissant à des règles logiques strictes (dites grammaire formelle ou syntaxe). 2) d'une sémantique sous-jacente. \*) La force des langages formels est de pouvoir faire abstraction de la sémantique, ce qui rend les théories réutilisables dans plusieurs modèles.

## Métaheuristique

Les *métaheuristiques* forment une famille d'algorithmes d'optimisation visant à résoudre des problèmes d'optimisation difficile (souvent issus des domaines de la recherche opérationnelle, de l'ingénierie ou de l'intelligence artificielle) pour lesquels nous ne connaissons pas de méthode classique plus efficace. Les métaheuristiques sont généralement des algorithmes itératifs, qui progressent vers un optimum par échantillonnage d'une *fonction objectif*. Elles se comportent comme des algorithmes de recherche, tentant d'intégrer les caractéristiques d'un problème afin d'en trouver une approximation de la meilleure solution. Il existe un grand nombre de métaheuristiques différentes, allant de la simple recherche locale à des algorithmes complexes de recherche globale. Ces méthodes utilisent cependant un haut niveau d'abstraction, leur permettant d'être adaptées à une large gamme de problèmes différents.

## Modèle

Un modèle est une représentation simplifiée d'une partie limitée de ce qui existe par rapport à ses éléments. Il est nécessaire de garder à l'esprit qu'un modèle est une construction intellectuelle d'un ensemble d'objets que nous simplifions pour mieux en appréhender la globalité (et éventuellement la conceptualiser de manière concrète). Les méthodes de modélisation peuvent être classifiées en trois groupes : 1) *Le modèle déterministe* : Ce modèle est basé sur l'élaboration d'équations différentielles ; le système est alors totalement prévisible puisqu'il est le résultat d'équations parfaitement établies. 2) *Le modèle stochastique* : Ce modèle introduit des phénomènes aléatoires grâce aux probabilités ; il rend compte du « hasard » que l'on retrouve communément dans les écosystèmes. 3) *Le modèle par simulation* : La simulation présente généralement l'avantage de se dispenser d'une modélisation mathématique ardue, et autorise théoriquement la simulation d'environnement à un très grand nombre d'acteurs aux comportements différents ; elle représente « le modèle plongé dans le temps ». \*) A chacun de ces modèles sont associés des méthodes et des outils qui ont apporté bon nombre de solutions à des problèmes de modélisation.

## Maladie Opportuniste

Une maladie opportuniste est une maladie due à des germes habituellement peu agressifs mais qui sont susceptibles de provoquer de graves complications en affectant des personnes ayant un système immunitaire très affaibli.

## Modélisateur

Le modélisateur réalise le débroussaillage de ces informations pour réaliser le « *modèle de conception* ». Il traduit de manière formelle les données spécifiques du domaine en un modèle considéré comme implémentable sans pour autant être d'ores et déjà transcrits informatiquement. C'est à ce niveau de la conception que les concepts développés en IAD sur les SMA sont employés afin de caractériser les propriétés des agents. C'est donc une étape cruciale et compliquée qui nécessite de pouvoir faire la transition entre le thématicien et l'informaticien. En outre, ce modèle de conception n'est pas finalisé d'emblée mais demande plusieurs itérations dans sa réalisation par un dialogue soutenue lors de la conception du « modèle du domaine » comme de celui réalisé par l'informaticien.

## Multifinalité

La multifinalité dans la théorie des contextes, en termes de causes et d'effets, énonce que des mêmes causes peuvent produire des effets différents en une sorte de « suite divergente ».

## Ontologie

Partie de la philosophie qui s'occupe de l'être, de sa nature.

## Oocyste

Les Oocystes sont une forme capsulée sous laquelle les parasites sont excrétés du tube digestif. Les oocystes, sorte d'œufs, ne sont pas immédiatement infectants après l'excrétion mais peuvent le devenir après 2 ou 3 jours en présence d'humidité et de chaleur.

## Pandémie

Une pandémie est une épidémie qui s'étend à la quasi-totalité d'une population considérée.

## Paradigme

(grec *paradeigma* : exemple, du verbe montrer) Terme utilisé en linguistique et en philosophie. Remis en scène par l'épistémologue Th. Kuhn autour de 1960. Déf. Générale : ensemble des traits caractérisant un mode d'interaction avec le monde. Peut se définir à différents niveaux : *Perception* : façon de percevoir, d'appréhender le monde. *Science* : Base de connaissances communes. *Epistémologie* : Grille de lecture. Trame théorique et hypothèses sur lesquelles repose toute science, et qui gouvernent la façon dont le scientifique pense et interprète les résultats de ses expériences. *Culture* : Attitude liée à une représentation du monde. *Méthodologie* : Moyens de traitement. (Ex: médecine physicaliste / médecine holistique). *Outils* : Moyens d'action. (Ex: prise de médicaments / prise en charge).

## Parasitologie

La parasitologie est l'étude des parasites, de leurs hôtes et de leurs interactions mutuelles. En tant que discipline biologique, le but de la parasitologie n'est pas déterminé par l'organisme ou l'environnement en question, mais par leur mode de vie. Ceci implique que c'est une synthèse d'autres disciplines, et élabore des techniques de domaines tels la biologie cellulaire, la bioinformatique, la biologie moléculaire, l'immunologie, la génétique et l'écologie.

## Phénomènes Complexes

Ce dit d'événements ayant lieu dans des systèmes composés d'un grand nombre d'éléments ou d'entités qui interagissent simultanément. La notion de phénomènes complexes est fortement couplée à celle d'émergence.

## Plate-forme Informatique

Une plate-forme est en informatique une base de travail à partir de laquelle on peut écrire, lire, utiliser, développer un ensemble de logiciels.

## Pluridisciplinaire

Synonyme de multidisciplinaire et s'appliquant à des activités ou des projets faisant appel à des spécialistes de plusieurs disciplines. Ne pas confondre avec interdisciplinaire ou transdisciplinaire.

## Prise de Décision

La *décision* est le fait d'effectuer un choix lors de la confrontation à un problème afin de le résoudre ; une approche particulière du concept de décision estime que la décision est un choix de type optimisateur. Afin d'optimiser cette résolution, la *théorie de l'utilité* de Von Neumann-Morgenstern préconise six principes à suivre selon lesquels la décision prise sera la meilleure. Cette théorie établit le fait que « prendre une décision » revient à avoir une démarche pragmatique régie par des règles déterminées. Nous pouvons, par conséquent, reproduire cette démarche de manière automatisée dans l'objectif de concevoir des systèmes d'aide à la décision. Le problème d'optimisation consiste à trouver la *meilleure* solution dans un ensemble discret de solutions réalisables.

## Protozoaire / Protiste

Selon la classification classique, le terme protiste (du grec *Protos* = premier) désigne l'un des règnes du vivant regroupant tous les êtres vivants mobiles et unicellulaires. Le règne des protistes se divise généralement en deux parties : 1) les protozoaires, à affinités animales. 2) les protophytes, à affinités végétales.

## Réductionnisme

Attitude qui consiste à réduire un système ou des phénomènes complexes à leurs composants plus simples et à considérer ces derniers comme plus fondamentaux que la totalité complexe.

## Relation (vs Interaction)

Lien entre les états de deux objets. Il y a une relation entre deux états si ceux-ci ne sont pas aléatoires, on peut alors les décrire par une table ou une règle. Une relation entre deux objets physiques est une interaction qui se manifeste par un flux de matière ou d'énergie et s'explique par une transformation dans un récepteur qui est fonction d'une transformation dans un émetteur. La catégorie « relation » et la catégorie « objet » représentent les deux catégories logiques primordiales permettant de rendre les systèmes intelligibles (système = tout organisé d'objets en relation).

## Rétroaction

Propriété de nature cybernétique des systèmes dont une partie du signal de sortie est renvoyée sur l'entrée. Cette injection peut se faire : 1) sans changement de signe : rétroaction positive, avec renforcement du signal d'entrée 2) avec changement de signe : rétroaction négative, avec neutralisation du signal d'entrée.

## Scientisme

Opinion philosophique de la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, mais encore vivante aujourd'hui, selon laquelle la science, en particulier la science empirico-rationaliste, permet de connaître la totalité de ce qui existe.

## Sémantique

D'une manière générale, la sémantique est une branche de la linguistique qui étudie les signifiés (une unité d'expression du langage, communément un mot, est une entité formée par la réunion d'un *signifié* (un concept) et d'un *signifiant* (une forme sonore ou *image acoustique*)). Le terme de sémantique est utilisé en opposition à celui de syntaxe dans l'étude des langages de programmation en informatique, pour laquelle elle a été développée de manière formelle. Il y a entre la sémantique et la syntaxe le même rapport qu'entre le fond et la forme. En informatique théorique, la *sémantique formelle* (des langages de programmation) est l'étude de la signification des programmes informatiques vus en tant qu'objets mathématiques.

## Simplexe Séquentiel

La méthode du simplexe séquentiel, à ne pas confondre avec l'algorithme du simplexe de Danzig populaire pour la résolution de problème de programmation linéaire, est une méthode graphique se basant sur la forme géométrique nommée simplexe. En géométrie, un *simplexe* ou *n-simplexe* est l'analogue à n-dimension du triangle. Plus exactement, un simplexe est l'enveloppe convexe d'un ensemble de (n+1) points formant un repère affine dans un espace euclidien de dimension n. Les expériences sont effectuées dans les conditions expérimentales correspondant aux coordonnées des sommets du simplexe dans un repère défini par les facteurs à évaluer. A chaque point est donc associée une réponse mesurée d'une fonction objectif à optimiser. L'idée générale consiste à supprimer le point pour lequel la réponse est jugée la plus « mauvaise » selon des critères expérimentaux définis et à le remplacer par un autre point situé à l'opposé de celui-ci sur l'axe passant par le centre de gravité des autres sommets. Un nouveau simplexe est alors déterminé par le nouveau point (auquel une nouvelle expérience à réaliser est associée) et les n sommets conservés. La procédure est alors répétée le nombre de fois nécessaire à l'obtention des critères d'optimisation désirés. La méthode procède par changements successifs de direction, chaque nouvelle mesure étant ajoutée aux précédentes, après l'élimination de la plus mauvaise.

## Simulation Orientée Agent

Etant donné la multitude de cas où nous rencontrons des systèmes complexes, nous pouvons dire que chaque SMA a des caractéristiques propres au sujet qu'il traite. Par conséquent, nous faisons la distinction entre le concept d'agents théoriques utilisés dans les SMA et les techniques employées dans les *Simulations Orientées Agents (SOA)* en montrant l'importance résidant dans la conception de ces simulations.

## Spéciation

En biologie, la spéciation est le processus évolutif par lequel de nouvelles espèces vivantes apparaissent.

## **Systeme**

(grec *systema* : ensemble) Dans le langage courant, mot pouvant signifier: a) un ensemble de composants matériels (ex: système solaire, système pileux, système nerveux), b) un ensemble de concepts ou d'idées (ex: système métrique, système philosophique), c) un ensemble de méthodes ou de procédés (système d'éducation, système D). Dans le contexte systémique, un système peut être défini de la façon la plus générale comme un tout organisé de composants en interaction. Cette définition générale fait ressortir les trois catégories primordiales nécessaires pour envisager un système générique : le monde des objets (composants), le monde des relations (interactions) et le monde de la totalité (entité existante). La science des systèmes s'occupe particulièrement d'une catégorie plus restreinte de systèmes, caractérisés par : 1) le fait d'exister comme des structures non-isolées, c'est-à-dire d'échanger de l'énergie, de la matière et de l'information avec leur environnement et entre leurs composants ("ouverture" matérielle, systèmes dynamiques, systèmes plus ou moins éloignés de l'équilibre thermodynamique). 2) le fait de correspondre à une organisation circulaire, c'est-à-dire d'avoir un réseau logique possédant une ou plusieurs des six boucles fermées suivantes : auto-organisation (rétroaction positive, morphogénèse), auto-régulation (rétroaction négative, homéostasie), recyclage matériel (cycles écologiques), auto-production (autopoïèse), auto-référence et auto-construction (autogénèse). 3) le fait d'être un tout cohérent ayant des attributs holistiques émergents, c'est-à-dire liés à l'entité comme totalité et non manifestes dans les composants séparés. \*) De tels systèmes sont caractérisés par un certain degré de complexité et un certain degré d'autonomie. Ces systèmes sont donc simultanément non-isolés (matériellement ouverts) sur le plan énergétique et opérationnellement clos sur le plan relationnel.

## **Systeme Multiagents**

Un système multi-agent (SMA) est un ensemble d'agents situés dans un certain environnement et interagissant selon une certaine organisation. Un agent est une entité caractérisée par le fait qu'elle est, au moins partiellement, autonome. Ce peut-être un processus, un robot, un être humain, un animal, etc. Objet de longue date de recherches en Intelligence Artificielle Distribuée, les systèmes multiagents représente un outil intéressant de modélisation de Phénomènes sociaux, et ont à ce titre des champs d'application larges, allant jusqu'aux sciences humaines.

## **Thématicien**

Le thématicien est celui qui définit le problème en premier, c'est de lui que vient le besoin. Il pose le contexte et délimite le système à étudier en fonction de ses connaissances et de ses interrogations. Pour des soucis de commodité parfois dus à son domaine d'étude, il se positionne le plus souvent selon le couple réductionniste / holiste que nous avons préalablement détaillé. De fait, il aura deux points de vue complémentaires : une optique locale lui permettant de définir les différents individus qui forment le système et qui constitueront les « agents conceptuels » de son modèle ; puis, une optique globale, tirée de son expertise, de ses observations ou relevant de la théorie, qui lui permettra principalement d'évaluer les résultats de la simulation. Grâce à ces connaissances, le thématicien peut concevoir un premier modèle que nous

appelons « *modèle du domaine* » qui représente et explique le comportement des individus réels en évolution dans le système cible.

### **Transdisciplinaire**

Se dit d'un modèle ou d'une activité qui dépasse les usages d'une seule discipline et possède un champ de validité plus large, recouvrant plusieurs disciplines. Ne pas confondre avec pluridisciplinaire ou interdisciplinaire.

### **Vie Artificielle**

La VA, plus récente, diverge de l'IA sur certains points et la rejoint sur d'autres. Son domaine d'étude est plus vaste. Elle explore les caractéristiques du vivant en général. La vie artificielle est, plus qu'un changement de nom, un changement d'objectif. Contrairement à ce qu'on pourrait croire, la VA, qui est une branche de l'IAD, ne relève pas d'ambitions aussi généralistes que l'IA à ses débuts et évite ainsi l'écueil de l'universalité. Il est vrai que la VA est une discipline plus jeune et qu'elle bénéficie, par conséquent, de l'expérience de l'IA. La Vie Artificielle exploite les concepts issus des courants cognitiviste et connexionniste qui partagent les sciences cognitives. Elle propose donc des solutions qui s'appuient tantôt sur l'approche symbolique, tantôt sur l'approche auto-organisationnelle, ou construit ses modèles à partir d'une combinaison des deux méthodologies.

# Annexes

Annexe 1 Exemple de « fiche acteur » utilisée pour la formalisation du problème : cas de la mouche.

## Fiche acteur Mouche

- Fréquence des contacts

- Zone de l'influence pour attirance des vecteurs

**Cas de *Musca domestica*** [Maheu&Maheu; Pest management recommendations for Poultry; internet]

- ◆ Les mouches sont attirées par la chaleur, la lumière et la nourriture
- ◆ **Nourriture:** Asticot se nourrit de matière organique en décomposition  
Adulte se nourrit de substance sucrée et fermentée  
Pour se nourrir, régurgitation pour dissolution des pièces solides (régurgitation du contenu stomacal)

- Production

- Nombre de productions par unité de temps (uniforme/condensée sur une période)

- ☑ [Graczyk *et al.* 1999 Am J Trop Med Hyg]
- ⇒ 4 (± 2) spots par cm<sup>2</sup> en 3 jours avec 250 mouches dans une cage de 22,8 dm<sup>3</sup>  
10 (± 2) spots par cm<sup>2</sup> soit 6 de plus en 5 jours avec 220 mouches dans une cage de 22,8 dm<sup>3</sup>  
17 (± 4) spots par cm<sup>2</sup> soit 7 de plus en 7 jours avec 190 mouches dans une cage de 22,8 dm<sup>3</sup>  
19 (± 3) spots par cm<sup>2</sup> soit 2 de plus en 9 jours avec 160 mouches dans une cage de 22,8 dm<sup>3</sup>  
20 (± 2) spots par cm<sup>2</sup> soit 1 de plus en 11 jours avec 130 mouches dans une cage de 22,8 dm<sup>3</sup>

- Combien de cryptos dans une production

Voir Interaction avec acteur *Cryptosporidium*

- Intéraction avec les autres acteurs (contacts)

### Acteur *Cryptosporidium*

- ◆ Nombre de contacts par unité de temps (uniforme/condensée sur une période)

- ◆ Taux de contamination

☑ [Graczyk *et al.* 2000 Am J Trop Med Hyg]

- **Fonction des saisons** Avril : 40 à 80 oocystes par mouche  
Mai : 5 à 18 oocystes par mouche  
Juin : 20 à 131 oocystes par mouche  
Juillet : 18 à 55 oocystes par mouche  
Août : 4 à 95 oocystes par mouche  
Septembre : en moy 45 oocystes par mouches
- **Fonction de *Cryptosporidium***  
Si présence de veaux infectés : 86 ± 10.4 oocystes par mouches  
Si absence de veaux infectés : 22 ± 5.4 oocystes par moches
- **Fonction de la mouche**  
Sur l'exosquelette : en moy 83 oocystes  
Dans les déjections : en moy 45.3 oocystes

☑ [Graczyk *et al.* 1999 Am J Trop Med Hyg]

▪ Même nombre de déjections par mouche avec ou sans *Cryptosporidium* dans le milieu environnant

▪ **Nombre d'oocystes portés par mouches piégées :**

Avec source d'infection de 20 ml de fèces bovine chargée par  $2.10^5$  oocystes par ml soit  $4.10^6$

oocystes :    au bout de 3 jours, 267 oocystes par mouche  
                  au bout de 5 jours, 131 oocystes par mouche  
                  au bout de 7 jours, 32 oocystes par mouche  
                  au bout de 9 jours, 19 oocystes par mouches  
                  au bout de 11 jours, 14 oocystes par mouches

☑ [Graczyk *et al.* 1999 letters cdc internet]

Etable avec veaux contaminés

▪ **Nombre d'oocystes par déjection :** 4 à 20 ( $7 \pm 3.2$ ) oocystes

▪ **Nombre d'oocystes détectés dans le tube digestif :** 1 à 8 oocystes par mouches

▪ 90% des mouches piégées portent des oocystes

▪ **Nombre d'oocystes portés par mouches piégées :** 2 à 246 (moy de 73) oocystes

- **Durée de vie de l'acteur**

**Cas de *Musca domestica*** [Maheu&Maheu; Pest management recommendations for Poultry; internet]

◆ **Développement:**  $\cong$  7 jours quand température entre 15 et 30°C (conditions optimales)  
De 12 à 35 jours voir 1 mois quand température mauvaise

◆ **Durée de vie d'un adulte:** de 2 à 5 semaines

◆ Entre 10 et 12 générations par an quand conditions optimales (pendant l'été)

- **Comment les acteurs sont introduits dans le système (étable)**

**Fonction des saisons :** [Graczyk *et al.* 2000 Am J Trop Med Hyg]

Avril : de 25 à 63 mouches piégées dans une étable pendant 1 mois

Mai : de 10 à 84 mouches ...

Juin : de 4 à 40 mouches ...

Juillet : de 10 à 20 mouches ...

Août : de 15 à 55 mouches ...

Septembre : en moy 20 mouches ...

**Fonction présence ou absence des veaux** [Graczyk *et al.* 2000 Am J Trop Med Hyg]

Piégeage sur 3 semaines

Quand absence :  $26 \pm 8.7$  mouches

Quand présence :  $41 \pm 4.7$  mouches

➤ **En cours de simulation ⇒ définir le flux entrant et sortant en fonction du temps**

**Cas de *Musca domestica*** [Maheu&Maheu; Pest management recommendations for Poultry; internet]

- ◆ **Ponte:** de 75 à 200 œufs tous les 3 à 4 jours  
Entre 400 et 900 œufs sur une vie  
Éclosion des œufs 12 à 24h après la ponte  
Ponte sur endroits humides et sur matière organique en décomposition

**Données diverses et interrogations:**

- **Portée de vol:** 8 km
- [Graczyk *et al.* 1999 Am J Trop Med Hyg]
- Jusqu'à 32 km avec 80% pas plus de 3.2 km
- Lors d'un contact, quelle est la probabilité qu'un crypto infecte ou soit inoffensif

## Annexe 2 Résultats des Simulations, scenarii A à F

Les résultats suivants sont obtenus à partir des scenarii détaillés au Chapitre IIIV.1 Mise en Place des Scenarii. Les agents porteurs initiaux du parasite sont représentés en bleu.

↳ *Scenario A : Apport des oocystes par l'eau : 5 oocystes par litre en flux continu.*

Expér n°	Vache 1	Vache 2	Vache 3	Vache 4	Vache 5	Veau 1	Veau 2	Veau 3	Veau 4	Veau 5	Tps Simul
1	106	74	17	116	205	Mort	Mort	6,8.10 <sup>5</sup>	1754	883	10j
2	188	38	258	2	1	Mort	Mort	1,2.10 <sup>5</sup>	1470	39	10j
3	1	0	304	0	0	Mort	0	3,5.10 <sup>5</sup>	317	2	10j
4	106	5	353	4	6	Mort	Mort	1,7.10 <sup>6</sup>	841	222	10j
5	9	104	10	12	70	Mort	Mort	8,04.10 <sup>4</sup>	1403	31	10j
6	43	7	30	11	20	Mort	Mort	4,65.10 <sup>4</sup>	970	213	10j
7	100	34	21	3	16	Mort	Mort	1,3.10 <sup>6</sup>	906	215	10j
8	61	2	143	143	1	Mort	Mort	1,14.10 <sup>5</sup>	53	30	10j
9	56	54	30	13	6	Mort	Mort	9,68.10 <sup>4</sup>	393	73	10j
10	48	56	1	2	20	Mort	Mort	2,1.10 <sup>5</sup>	654	12	10j
11	4	4	0	1	0	Mort	Mort	3,18.10 <sup>3</sup>	2868	54	10j
12	40	2	0	4	1	Mort	Mort	4,10 <sup>5</sup>	1807	137	10j
13	49	35	31	5	46	Mort	Mort	1,1.10 <sup>6</sup>	5737	159	10j
14	56	58	3	3	0	Mort	Mort	6,6.10 <sup>5</sup>	1072	266	10j
15	55	84	86	225	241	Mort	Mort	1,9.10 <sup>5</sup>	605	3	10j
16	113	170	64	257	66	Mort	Mort	1,2.10 <sup>5</sup>	1821	9	10j
17	37	216	59	82	24	Mort	Mort	2.10 <sup>5</sup>	2757	168	10j
18	40	13	1	1	2	Mort	Mort	1,21.10 <sup>3</sup>	311	105	10j
19	9	79	233	24	8	Mort	Mort	3,8.10 <sup>5</sup>	1931	15	10j
20	1	0	0	0	0	Mort	0	0	15	1	10j
<b>Moy</b>	<b>40</b>	<b>66</b>	<b>48</b>	<b>60</b>	<b>39</b>			<b>3,06.10<sup>5</sup></b>	<b>1892</b>	<b>92</b>	
Ec. Type	31,11	70,67	68,91	93,69	70,81			333100,48	1576,39	85,56	

↳ *Scenario B : Apport des oocystes par les mouches : 10 oocystes par mouches (50 oocystes au total).*

Expér n°	Vache 1	Vache 2	Vache 3	Vache 4	Vache 5	Veau 1	Veau 2	Veau 3	Veau 4	Veau 5	Tps Simul
1	5	355	41	0	21	Mort	1,7.10 <sup>6</sup>	213	1039	216	10j
2	37	152	4	1	2	Mort	Mort	3,3.10 <sup>5</sup>	2852	114	10j
3	63	2	52	9	35	Mort	1.10 <sup>5</sup>	3,3.10 <sup>5</sup>	1077	378	10j
4	49	17	14	7	1	Mort	Mort	1,13.10 <sup>4</sup>	2	25	10j
5	228	126	48	5	82	Mort	Mort	1,4.10 <sup>5</sup>	703	256	10j
6	1	1	0	0	0	Mort	Mort	0	207	33	10j
7	19	46	87	12	30	Mort	Mort	1,2.10 <sup>4</sup>	1368	133	10j
8	7	24	81	2	80	Mort	3,7.10 <sup>5</sup>	449	2594	396	10j
9	69	6	214	78	36	Mort	2,9.10 <sup>6</sup>	2,9.10 <sup>3</sup>	320	11	10j
10	121	342	149	127	193	1,8.10 <sup>6</sup>	5,2.10 <sup>6</sup>	1,3.10 <sup>6</sup>	1639	561	10j
11	7	1	2	0	9	Mort	6,47.10 <sup>5</sup>	7,07.10 <sup>4</sup>	8	37	10j
12	335	320	11	1	7	Mort	Mort	1,8.10 <sup>6</sup>	2720	61	10j
13	11	77	31	2	3	Mort	Mort	3,7.10 <sup>5</sup>	384	169	10j
14	84	0	130	24	3	Mort	Mort	1.10 <sup>6</sup>	200	293	10j
15	245	492	6	823	160	Mort	6.10 <sup>6</sup>	1,2.10 <sup>5</sup>	2734	100	10j
16	108	43	11	1	1	Mort	Mort	3,5.10 <sup>5</sup>	208	261	10j
17	28	14	28	3	14	Mort	Mort	3,4.10 <sup>5</sup>	1057	133	10j
18	120	209	79	19	13	Mort	Mort	1,4.10 <sup>5</sup>	1122	45	10j
19	41	1	34	52	62	Mort	Mort	1,5.10 <sup>5</sup>	630	286	10j
20	57	21	24	2	21	Mort	Mort	2,77.10 <sup>4</sup>	387	29	10j
<b>Moy</b>	<b>82</b>	<b>112</b>	<b>52</b>	<b>58</b>	<b>39</b>			<b>3,25.10<sup>5</sup></b>	<b>1063</b>	<b>177</b>	
Ec.Type	88,64	146,40	55,33	178,23	52,33			474099,42	941,96	147,24	

↳ *Scenario C : arrivée des oocystes par les vaches. En début de simulation, chaque vache porte 10 oocystes soit un total de 50 oocystes.*

Expér n°	Vache 1	Vache 2	Vache 3	Vache 4	Vache 5	Veau 1	Veau 2	Veau 3	Veau 4	Veau 5	Tps Simul
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10j
2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10j
3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	10j
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10j
5	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10j
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10j
7	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	10j
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10j
9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10j
10	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	10j
11	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	10j
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10j
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10j
14	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10j
15	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	10j
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10j
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10j
18	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10j
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10j
20	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	10j
<b>Moy</b>	<b>0</b>										
EC.Type	0.59	0.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	

↳ *Scenario D : Arrivée des oocystes par un 6e veau avec variation de l'EIC. 50 oocystes sont amenés par un veau extérieur à l'étable.*

- EIC = 20%

Expér n°	Vache 1	Vache 2	Vache 3	Vache 4	Vache 5	Veau 1	Veau 2	Veau 3	Veau 4	Veau 5	Veau 6	Tps Simul
1	17	24	5	19	10	1.10 <sup>6</sup>	2,1.10 <sup>5</sup>	408	69	157	23705	10j
2	14	51	236	2	0	Mort	Mort	1,3.10 <sup>5</sup>	273	38	34889	10j
3	321	6	259	267	199	Mort	3,5.10 <sup>6</sup>	4,4.10 <sup>5</sup>	1103	230	26797	10j
4	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	10j
5	208	46	28	248	25	Mort	Mort	6,36.10 <sup>4</sup>	2662	50	32145	10j
6	142	23	30	5	1	Mort	Mort	2,8.10 <sup>5</sup>	1261	113	30479	10j
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10j
8	66	20	114	177	9	Mort	Mort	4713	2702	184	23462	10j
9	117	177	315	328	10	Mort	4.10 <sup>6</sup>	33056	199	671	31803	10j
10	163	47	1	6	0	Mort	1,9.10 <sup>6</sup>	2,5.10 <sup>5</sup>	1436	280	24663	10j
11	45	37	4	12	18	Mort	Mort	5,7.10 <sup>5</sup>	4565	597	15935	10j
12	731	72	1	31	115	7.10 <sup>4</sup>	Mort	415	308	384	19223	10j
13	94	58	32	12	28	Mort	Mort	1,2.10 <sup>5</sup>	2	277	21503	10j
14	142	11	287	3	1	Mort	Mort	4,4.10 <sup>5</sup>	1629	145	29035	10j
15	6	32	1	4	3	Mort	Mort	79551	4874	456	41451	10j
16	2	33	65	56	4	Mort	2,1.10 <sup>6</sup>	11937	2401	315	38518	10j
17	323	72	183	1	62	Mort	Mort	3,3.10 <sup>5</sup>	7322	511	30022	10j
18	2	359	35	202	2	Mort	Mort	92443	519	225	39130	10j
19	70	2	23	64	0	Mort	Mort	1,5.10 <sup>5</sup>	631	6	19825	10j
20	174	349	63	14	10	Mort	Mort	16075	2418	406	37375	10j
<b>Moy</b>	<b>132</b>	<b>71</b>	<b>84</b>	<b>73</b>	<b>25</b>			<b>1,51.10<sup>5</sup></b>	<b>1719</b>	<b>252</b>	<b>25998</b>	
EC.Type	168,64	101,77	105,38	104,01	48,20			170655,00	1917,20	196,16	11101,44	

- EIC = 30%

Expér n°	Vache 1	Vache 2	Vache 3	Vache 4	Vache 5	Veau 1	Veau 2	Veau 3	Veau 4	Veau 5	Veau 6	Tps Simul
1	43	28	25	16	43	46121	12086	1559	2	27	8,4.10 <sup>6</sup>	10j
2	57	132	31	61	34	Mort	Mort	2,2.10 <sup>5</sup>	526	484	1,5.10 <sup>7</sup>	10j
3	133	15	0	0	1	33	1421	6858	233	480	1,9.10 <sup>7</sup>	10j
4	106	6	155	72	412	Mort	2.10 <sup>6</sup>	48214	190	243	1,7.10 <sup>7</sup>	10j
5	199	13	0	3	1	Mort	2.10 <sup>6</sup>	177	115	1	9465	10j
6	313	253	494	160	184	Mort	5,6.10 <sup>6</sup>	60684	3473	483	1,6.10 <sup>7</sup>	10j
7	136	86	58	3	1	Mort	2,2.10 <sup>5</sup>	19002	586	34	1,2.10 <sup>7</sup>	10j
8	164	24	1	217	5	Mort	4,2.10 <sup>5</sup>	32179	1494	359	1,1.10 <sup>7</sup>	10j
9	45	215	448	219	128	Mort	3.10 <sup>5</sup>	2181	229	0	9,8.10 <sup>6</sup>	10j
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10j
11	17	40	8	5	5	Mort	Mort	174	605	438	1,4.10 <sup>7</sup>	10j
12	5	6	199	110	2	5,5.10 <sup>5</sup>	5,5.10 <sup>6</sup>	1500	1	614	3,3.10 <sup>7</sup>	10j
13	9	161	464	35	62	Mort	Mort	4.10 <sup>5</sup>	420	88	2,6.10 <sup>7</sup>	10j
14	61	29	6	289	120	Mort	46943	4481	40	208	1,7.10 <sup>7</sup>	10j
15	20	84	20	10	0	Mort	2,2.10 <sup>6</sup>	279	1187	19	1,1.10 <sup>7</sup>	10j
16	45	30	29	151	6	Mort	1.10 <sup>6</sup>	1,1.10 <sup>5</sup>	2138	167	1,6.10 <sup>7</sup>	10j
17	264	71	69	2	2	Mort	Mort	16093	2460	1258	1,1.10 <sup>7</sup>	10j
18	1	6	6	1	77	12359	618	60	9	160	1,1.10 <sup>7</sup>	10j
19	141	333	1	1	5	Mort	Mort	7,5.10 <sup>5</sup>	1330	140	2,3.10 <sup>7</sup>	10j
20	199	182	138	19	103	Mort	Mort	1,1.10 <sup>5</sup>	310	956	1,4.10 <sup>7</sup>	10j
<b>Moy</b>	<b>98</b>	<b>86</b>	<b>108</b>	<b>69</b>	<b>60</b>			<b>89172</b>	<b>767</b>	<b>308</b>	<b>1,4.10<sup>7</sup></b>	
EC.Type	90,29	93,65	161,59	88,20	96,69			179416,59	941,61	330,22	7476125,63	

- EIC = 40%

Expér n°	Vache 1	Vache 2	Vache 3	Vache 4	Vache 5	Veau 1	Veau 2	Veau 3	Veau 4	Veau 5	Veau 6	Tps Simul
1	26	0	3	2	0	Mort	1,1.10 <sup>6</sup>	599	437	19	18322	10j
2	0	1	0	0	0	0	28109	0	2	10	15181	10j
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10j
4	47	2	1	4	0	1,2.10 <sup>5</sup>	1522	13980	23	12	14919	10j
5	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10j
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10j
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10j
8	76	81	37	33	0	Mort	2.10 <sup>5</sup>	313	58	40	17816	10j
9	13	5	1	25	0	Mort	32958	251	10	57	14999	10j
10	0	0	0	0	0	38	0	0	16	0	17607	10j
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10j
12	1	0	0	0	1	2100	0	0	10	16	18844	10j
13	58	3	53	32	10	Mort	Mort	3130	746	18	17597	10j
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10j
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10j
16	2	22	34	0	0	0	0	58	79	14	14084	10j
17	3	52	1	10	0	21025	Mort	32098	807	39	13355	10j
18	21	23	9	6	1	Mort	4,7.10 <sup>5</sup>	3365	5	389	272	10j
19	19	156	59	38	95	Mort	1,7.10 <sup>6</sup>	66	443	3	17477	10j
20	5	0	0	0	0	39	0	289	6	0	18887	10j
<b>Moy</b>	<b>14</b>	<b>17</b>	<b>10</b>	<b>8</b>	<b>5</b>	<b>10229</b>	<b>196255</b>	<b>2707</b>	<b>132</b>	<b>31</b>	<b>9968</b>	
EC.Type	21,58	37,88	18,64	12,67	20,68	30916,58	451509,23	7419,05	250,66	83,68	8238,95	

- EIC = 50%

Expér n°	Vache 1	Vache 2	Vache 3	Vache 4	Vache 5	Veau 1	Veau 2	Veau 3	Veau 4	Veau 5	Veau 6	Tps Simul
1	1	0	0	0	0	0	0	10123	0	0	10	10j
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	10j
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10j
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27	10j
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	10j
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	10j
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10j
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10j
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	10j
10	1	239	1	7	1	Mort	1,2.10 <sup>6</sup>	0	1411	479	22	10j
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10j
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	10j
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10j
14	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	24	10j
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	10j
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	10j
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16	10j
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	21	10j
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10j
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	10j
<b>Moy</b>	<b>0</b>	<b>12</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>		<b>60000</b>	<b>506</b>	<b>71</b>	<b>24</b>	<b>9</b>	
EC.Type	0,30	52,09	0,22	1,53	0,22		261533,94	2206,26	307,42	104,38	8,68	

- EIC = 60%

Expér n°	Vache 1	Vache 2	Vache 3	Vache 4	Vache 5	Veau 1	Veau 2	Veau 3	Veau 4	Veau 5	Veau 6	Tps Simul
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10j
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	10j
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	10j
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10j
5	0	0	0	0	0	0	69	0	0	0	1	10j
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	10j
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	10j
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	10j
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	10j
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	10j
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	10j
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	10j
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	10j
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10j
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10j
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10j
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10j
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	10j
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	10j
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	10j
Moy	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	
Ec.Type	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	15,04	0,00	0,00	0,00	0,60	

↳ Scenario E : Arrivée des oocystes par un veau interne à l'étable : 50 oocystes sont apportés par le veau 1 dont l'EIC=20%

Expér n°	Vache 1	Vache 2	Vache 3	Vache 4	Vache 5	Veau 1	Veau 2	Veau 3	Veau 4	Veau 5	Tps Simul
1	198	33	17	35	0	Mort	Mort	76	67	169	10j
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10j
3	2	99	134	7	157	Mort	Mort	7,8.10 <sup>5</sup>	6983	305	10j
4	6	5	0	1	2	Mort	Mort	21	870	24	10j
5	1	0	0	0	0	Mort	0	33461	0	1	10j
6	3	0	1	0	0	Mort	0	0	0	0	10j
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10j
8	317	623	29	49	3	Mort	5,7.10 <sup>6</sup>	1,1.10 <sup>5</sup>	50	936	10j
9	2	1	0	0	0	Mort	0	525	241	1	10j
10	29	11	5	23	14	Mort	1.10 <sup>6</sup>	1,7.10 <sup>5</sup>	4452	178	10j
11	164	19	1	116	89	Mort	8,3.10 <sup>6</sup>	1,2.10 <sup>5</sup>	2294	88	10j
12	295	189	77	44	33	Mort	26602	1,7.10 <sup>6</sup>	1941	399	10j
13	31	95	137	20	9	Mort	9,5.10 <sup>5</sup>	5178	425	181	10j
14	131	2	51	64	32	Mort	Mort	1,4.10 <sup>6</sup>	979	769	10j
15	76	1	9	3	9	Mort	206	964	469	21	10j
16	1	0	138	2	22	7,4.10 <sup>6</sup>	Mort	32021	233	419	10j
17	413	414	16	418	8	Mort	2,8.10 <sup>6</sup>	4,2.10 <sup>5</sup>	1894	624	10j
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10j
19	0	0	0	0	0	Mort	0	0	0	0	10j
20	0	0	5	1	0	Mort	12	2994	565	67	10j
Moy	83	75	31	39	19			292762	1073	209	
Ec.Type	124,44	158,80	48,27	91,70	37,72			519797,57	1742,43	275,36	

↳ Scenario F : Arrivée des oocystes par un veau interne à l'étable (veau 1; EIC = 20%). Variation de la quantité d'oocystes apportée (de 25 à 1000 oocystes).

- Oocystes = 25

Expér n°	Vache 1	Vache 2	Vache 3	Vache 4	Vache 5	Veau 1	Veau 2	Veau 3	Veau 4	Veau 5	Tps Simul
1	25	0	1	9	0	Mort	17136	6732	17	2	10j
2	179	73	137	49	0	Mort	1,4.10 <sup>6</sup>	1	534	7	10j
3	68	7	5	0	0	Mort	Mort	3197	204	17	10j
4	0	0	0	0	0	Mort	0	0	0	0	10j
5	54	0	0	0	18	Mort	5,9.10 <sup>6</sup>	1874	3	208	10j
6	2	10	2	0	0	Mort	895	2,87.10 <sup>4</sup>	1049	1	10j
7	10	8	6	10	2	Mort	Mort	26011	19	43	10j
8	0	0	0	0	0	Mort	0	0	0	0	10j
9	15	21	1	0	0	Mort	Mort	16876	494	39	10j
10	475	13	57	1	14	Mort	1,9.10 <sup>6</sup>	78284	8881	568	10j
11	10	82	606	10	2	Mort	Mort	1,4.10 <sup>5</sup>	404	217	10j
12	55	45	61	32	9	Mort	2,5.10 <sup>6</sup>	75948	284	226	10j
13	104	37	0	0	4	Mort	57222	991	746	56	10j
14	49	59	19	3	1	Mort	Mort	81650	632	423	10j
15	0	0	0	0	0	Mort	0	0	2	0	10j
16	7	43	4	2	0	Mort	Mort	84	2943	24	10j
17	14	2	11	103	0	Mort	5,5.10 <sup>6</sup>	1964	1295	451	10j
18	593	160	74	196	38	Mort	3,7.10 <sup>6</sup>	15795	1045	478	10j
19	3	0	6	6	1	Mort	26	65958	305	121	10j
20	9	0	20	0	24	Mort	Mort	2,3.10 <sup>5</sup>	84	167	10j
Moy	84	28	51	21	6			38703	947	152	
EC.Type	157,27	39,70	131,99	46,86	10,02			58117,67	1940,83	181,70	

- Oocystes = 50 → cf. scenario E

- Oocystes = 75

Expér n°	Vache 1	Vache 2	Vache 3	Vache 4	Vache 5	Veau 1	Veau 2	Veau 3	Veau 4	Veau 5	Tps Simul
1	26	8	106	114	46	Mort	Mort	1,9.10 <sup>6</sup>	1405	41	10j
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10j
3	73	1	52	18	5	Mort	Mort	4,8.10 <sup>5</sup>	3016	478	10j
4	4	3	134	1	0	Mort	29743	1,6.10 <sup>5</sup>	1321	119	10j
5	2	1	7	0	1	Mort	35	13047	1606	20	10j
6	28	19	80	59	4	Mort	Mort	3,2.10 <sup>6</sup>	1906	286	10j
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10j
8	2	10	28	2	239	Mort	43	5,1.10 <sup>5</sup>	5	32	10j
9	5	3	6	1	5	Mort	Mort	0	11	169	10j
10	1	41	19	4	22	Mort	Mort	27359	490	161	10j
11	0	50	0	0	2	Mort	64746	4,6.10 <sup>5</sup>	1693	168	10j
12	3	572	0	5	0	Mort	1.10 <sup>6</sup>	70	467	85	10j
13	13	46	332	175	7	Mort	6.10 <sup>6</sup>	343	857	7	10j
14	0	0	0	0	0	Mort	0	0	0	0	10j
15	5	158	374	2	27	Mort	6,8.10 <sup>6</sup>	11702	3119	373	10j
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10j
17	61	112	89	39	35	Mort	Mort	95904	2210	161	10j
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10j
19	80	3	4	8	15	Mort	6,9.10 <sup>5</sup>	8092	5543	38	10j
20	8	13	51	13	10	Mort	1,10 <sup>6</sup>	1	22	258	10j
Moy	16	52	64	22	21			343326	1184	120	
EC.Type	24,89	126,02	104,40	44,44	51,66			782002,73	1421,41	134,82	

- Oocystes = 100

Expér n°	Vache 1	Vache 2	Vache 3	Vache 4	Vache 5	Veau 1	Veau 2	Veau 3	Veau 4	Veau 5	Tps Simul
1	120	128	46	5	22	Mort	3.10 <sup>6</sup>	1,7.10 <sup>6</sup>	2003	228	10j
2	1	7	14	45	1	Mort	5.10 <sup>5</sup>	3,7.10 <sup>5</sup>	1658	63	10j
3	0	1	0	0	0	Mort	0	117	4	0	10j
4	174	103	81	284	15	Mort	Mort	2,4.10 <sup>5</sup>	26	265	10j
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10j
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10j
7	125	106	149	374	595	Mort	Mort	2,5.10 <sup>5</sup>	4184	318	10j
8	5	281	17	5	6	Mort	Mort	4,8.10 <sup>5</sup>	1068	735	10j
9	59	30	9	11	88	Mort	Mort	8,7.10 <sup>5</sup>	2797	851	10j
10	47	44	8	1	13	Mort	Mort	4,4.10 <sup>5</sup>	1705	52	10j
11	11	6	24	3	1	Mort	2,2.10 <sup>5</sup>	5,410 <sup>5</sup>	1512	3	10j
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10j
13	441	11	5	2	30	Mort	1,2.10 <sup>6</sup>	9,4.10 <sup>5</sup>	1821	2	10j
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10j
15	102	54	33	8	17	Mort	Mort	8,6.10 <sup>5</sup>	839	169	10j
16	1	68	76	1	11	Mort	Mort	332	133	11	10j
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10j
18	114	99	4	8	5	Mort	Mort	2632	1596	91	10j
19	0	0	0	0	0	0	0	0	53	0	10j
20	141	32	0	61	18	Mort	7,2.10 <sup>6</sup>	7357	1976	97	10j
<b>Moy</b>	<b>67</b>	<b>49</b>	<b>23</b>	<b>40</b>	<b>41</b>			<b>335022</b>	<b>1069</b>	<b>144</b>	
<b>EC.Type</b>	<b>103,44</b>	<b>67,66</b>	<b>37,50</b>	<b>98,48</b>	<b>128,56</b>			<b>447099,97</b>	<b>1141,76</b>	<b>237,13</b>	

- Oocystes = 500

Expér n°	Vache 1	Vache 2	Vache 3	Vache 4	Vache 5	Veau 1	Veau 2	Veau 3	Veau 4	Veau 5	Tps Simul
1	190	40	28	4	86	Mort	Mort	2,2.10 <sup>6</sup>	711	611	10j
2	12	32	43	104	53	Mort	7.10 <sup>5</sup>	26329	2739	54	10j
3	5	233	9	8	419	Mort	8.10 <sup>5</sup>	3,8.10 <sup>5</sup>	1936	214	10j
4	123	29	1	1	5	Mort	Mort	2.10 <sup>6</sup>	55	252	10j
5	15	122	141	5	5	Mort	5,7.10 <sup>5</sup>	6,1.10 <sup>5</sup>	1223	130	10j
6	1	2	0	0	0	Mort	1,8.10 <sup>6</sup>	4102	935	3	10j
7	0	20	3	6	0	1,5.10 <sup>6</sup>	1	24143	0	1	10j
8	34	136	41	19	2	Mort	1,6.10 <sup>6</sup>	3,7.10 <sup>6</sup>	77	447	10j
9	0	0	0	0	0	Mort	0	0	14	0	10j
10	1	0	0	0	1	Mort	11	2471	729	0	10j
11	29	34	10	80	0	Mort	Mort	1.10 <sup>5</sup>	111	438	10j
12	90	131	67	77	32	Mort	5.10 <sup>6</sup>	1,4.10 <sup>6</sup>	1009	50	10j
13	13	34	104	49	58	Mort	Mort	27	4000	88	10j
14	497	20	370	207	1	Mort	Mort	6,6.10 <sup>5</sup>	1288	200	10j
15	0	0	0	0	0	Mort	0	0	0	0	10j
16	0	0	0	0	0	Mort	0	0	0	0	10j
17	2	157	112	0	0	Mort	Mort	572	16	90	10j
18	18	1	1	1	3	Mort	1,6.10 <sup>6</sup>	6112	56	73	10j
19	112	39	0	16	31	Mort	Mort	5.10 <sup>5</sup>	410	1	10j
20	0	0	0	0	0	Mort	0	0	0	0	10j
<b>Moy</b>	<b>57</b>	<b>52</b>	<b>47</b>	<b>29</b>	<b>35</b>			<b>580688</b>	<b>765</b>	<b>133</b>	
<b>EC.Type</b>	<b>113,26</b>	<b>65,01</b>	<b>85,41</b>	<b>51,24</b>	<b>91,37</b>			<b>973639,31</b>	<b>1044,24</b>	<b>174,09</b>	

- Oocystes = 1000

Expér n°	Vache 1	Vache 2	Vache 3	Vache 4	Vache 5	Veau 1	Veau 2	Veau 3	Veau 4	Veau 5	Tps Simul
1	1	3	53	20	1	Mort	Mort	24999	732	63	10j
2	22	55	33	170	278	Mort	5,8.10 <sup>6</sup>	8,5.10 <sup>5</sup>	6571	31	10j
3	107	188	36	24	1	Mort	4,1.10 <sup>6</sup>	6331	6521	67	10j
4	400	425	76	214	69	Mort	Mort	3,9.10 <sup>5</sup>	1040	35	10j
5	118	36	9	16	5	Mort	Mort	3,3.10 <sup>5</sup>	11237	236	10j
6	2	0	2	1	0	Mort	0	0	299	5	10j
7	0	1	0	0	0	Mort	0	0	0	0	10j
8	0	0	360	1	0	Mort	2,5.10 <sup>6</sup>	0	0	0	10j
9	1	2	31	80	0	Mort	Mort	118	231	320	10j
10	1	1	0	377	1	Mort	1,6.10 <sup>5</sup>	1,7.10 <sup>6</sup>	224	10	10j
11	1	339	25	3	0	Mort	68823	3,1.10 <sup>5</sup>	9	228	10j
12	1	3	14	23	1	Mort	1,1.10 <sup>5</sup>	22107	2340	54	10j
13	383	161	108	3	0	Mort	Mort	3.10 <sup>6</sup>	1150	238	10j
14	19	1	7	3	3	Mort	Mort	1,7.10 <sup>5</sup>	26	6	10j
15	86	107	45	72	39	Mort	Mort	41161	1012	12	10j
16	68	8	231	95	214	Mort	Mort	2,5.10 <sup>6</sup>	78	95	10j
17	100	1	0	1	19	Mort	Mort	7815	785	0	10j
18	16	11	0	0	1	Mort	1,5.10 <sup>5</sup>	22	349	78	10j
19	37	0	0	1	1	Mort	5,3.10 <sup>5</sup>	15164	20	0	10j
20	48	49	2	3	18	Mort	Mort	32246	1247	23	10j
<b>Moy</b>	<b>71</b>	<b>70</b>	<b>52</b>	<b>55</b>	<b>33</b>			<b>469998</b>	<b>1694</b>	<b>75</b>	
<b>EC.Type</b>	<b>113,87</b>	<b>117,99</b>	<b>88,40</b>	<b>94,33</b>	<b>73,79</b>			<b>861240,78</b>	<b>2885,67</b>	<b>95,81</b>	

### Annexe 3 Aperçu de l'Interface Utilisateur et du Format des Résultats

The screenshot shows a simulation interface with several panels and a graph. Callout boxes provide the following descriptions:

- Indique l'avancement des expériences**: Points to the simulation title bar: "Durée : 30j, de la simulation n°115 de l'expérience n°119".
- Permet d'ajouter ou de retirer des agents**: Points to the input fields for "Nombre de vaches(s)", "Nombre de veaux(s)", and "Nombre de mouches(s)".
- Durée en cycles et en temps depuis le lancement de la simulation**: Points to the "Temps" field showing "713" and "Jours 11 jours 20h 15min".
- Permet de suivre l'évolution des contacts dans le système**: Points to the "Contact" graph showing lines for "Vache", "Veau", and "Mouche".
- Panel de contrôle des simulations**: Points to the control buttons: "Démarrer", "Arrêter", "Fin", "Pause", "Modif", "Simul", "Xéto", "Singleste", and "Mouche".
- Représentation des agents « Vaches » et de leur évolution**: Points to the "Vache" table.
- Représentation des agents « Veaux » et de leur évolution**: Points to the "Veau" table.
- Représentation des agents « Mouches » et de leur évolution**: Points to the "Mouche" table.
- Evolution du nombre de parasites présents dans le système**: Points to the "Evolution du nombre de cystes" graph.
- Active l'optimisation de la taille du simplexe**: Points to the "Plus de commentaires" checkbox.
- Affiche la fréquence des nettoyages dans l'étable**: Points to the "Fréquence de nettoyage" label.
- Affichage de renseignements complémentaires permettant de faire des pauses à chaque moment clé des expériences**: Points to the "Fréquence de nettoyage: Tous les 18 jours (prochain à 25 jours à 18 heures)" label.

Vache n°	Cycto	Immuno	Nbre Max
n°1	214	60%	3.7E+007
n°2	182	70%	2.3E+007
n°3	121	80%	1.9E+007
n°4	33	90%	1.1E+007
n°5	2	100%	1.0E+007

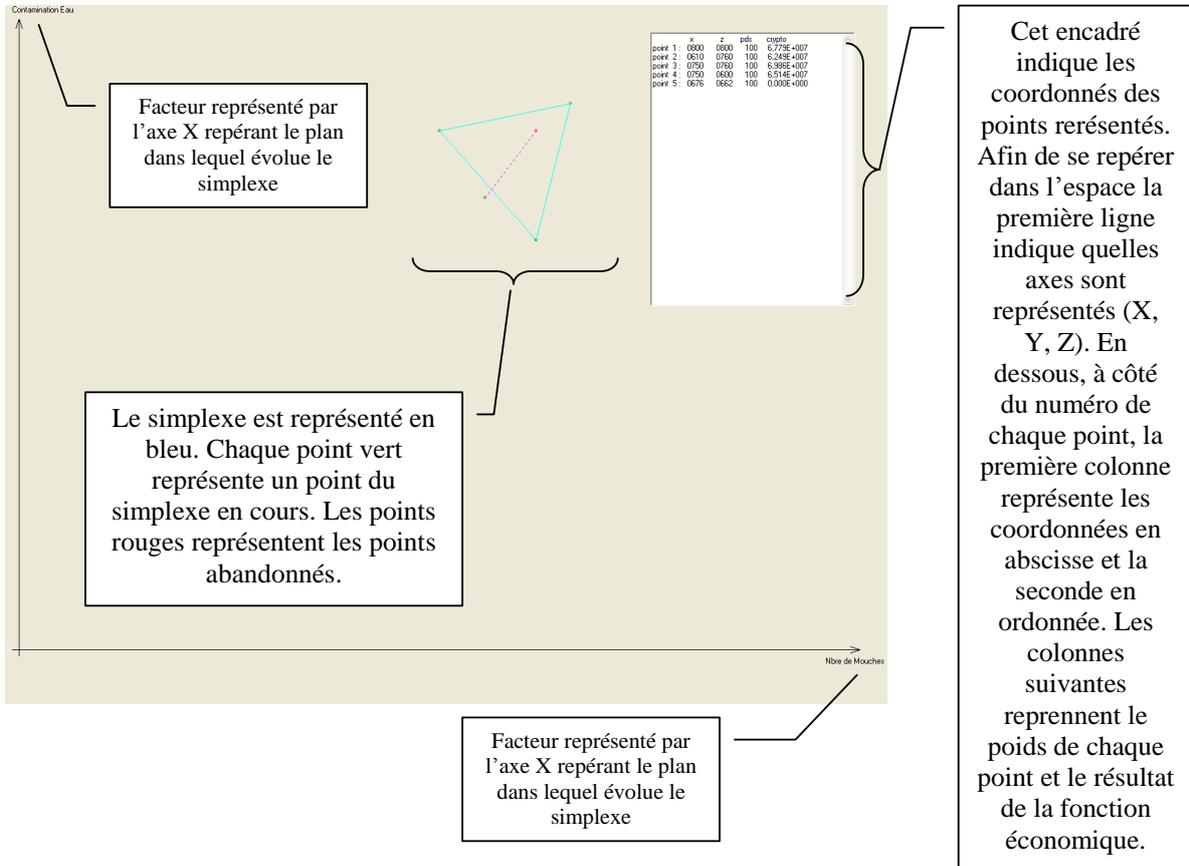
Veau n°	Cycto	Immuno	Nbre Max
n°1	0	20%	8.3E+005
n°2	0	30%	7.3E+005
n°3	0	40%	6.4E+005
n°4	2699	50%	4.1E+005
n°5	280	60%	4.4E+005

Mouche n°	Cycto
n°1	53
n°2	0
n°3	10
n°4	731
n°5	0
n°6	0
n°7	4
n°8	5
n°9	0
n°10	10

A la fin de chaque expérience, la fenêtre suivante, regroupant toutes les statistiques des simulations de chaque expérience, s'ouvre.



Puis, la progression du simplexe est projetée sur chacune des faces du repère :

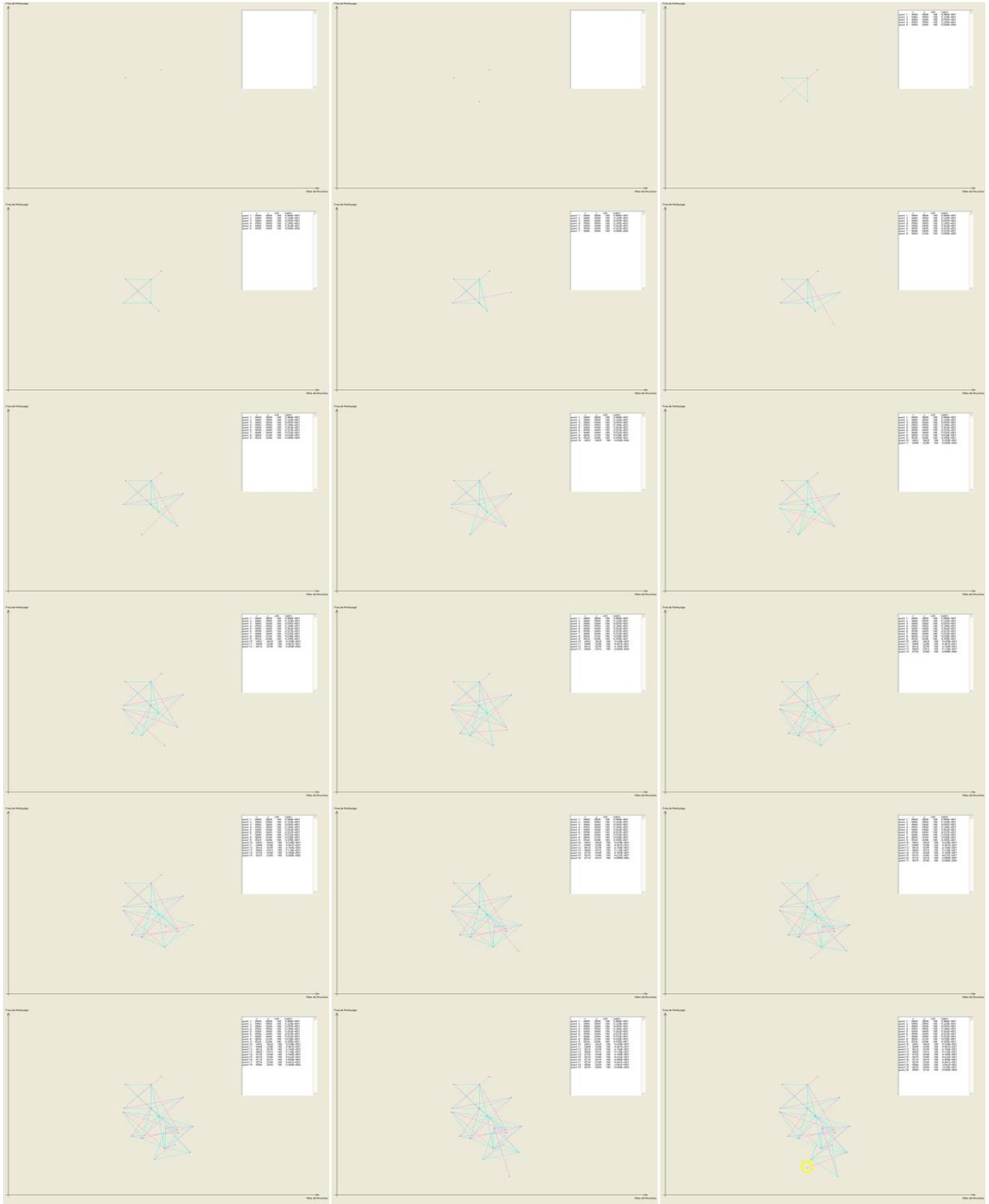


## Annexe 4 Résultats des Expériences, obtenus avec le Méta-système

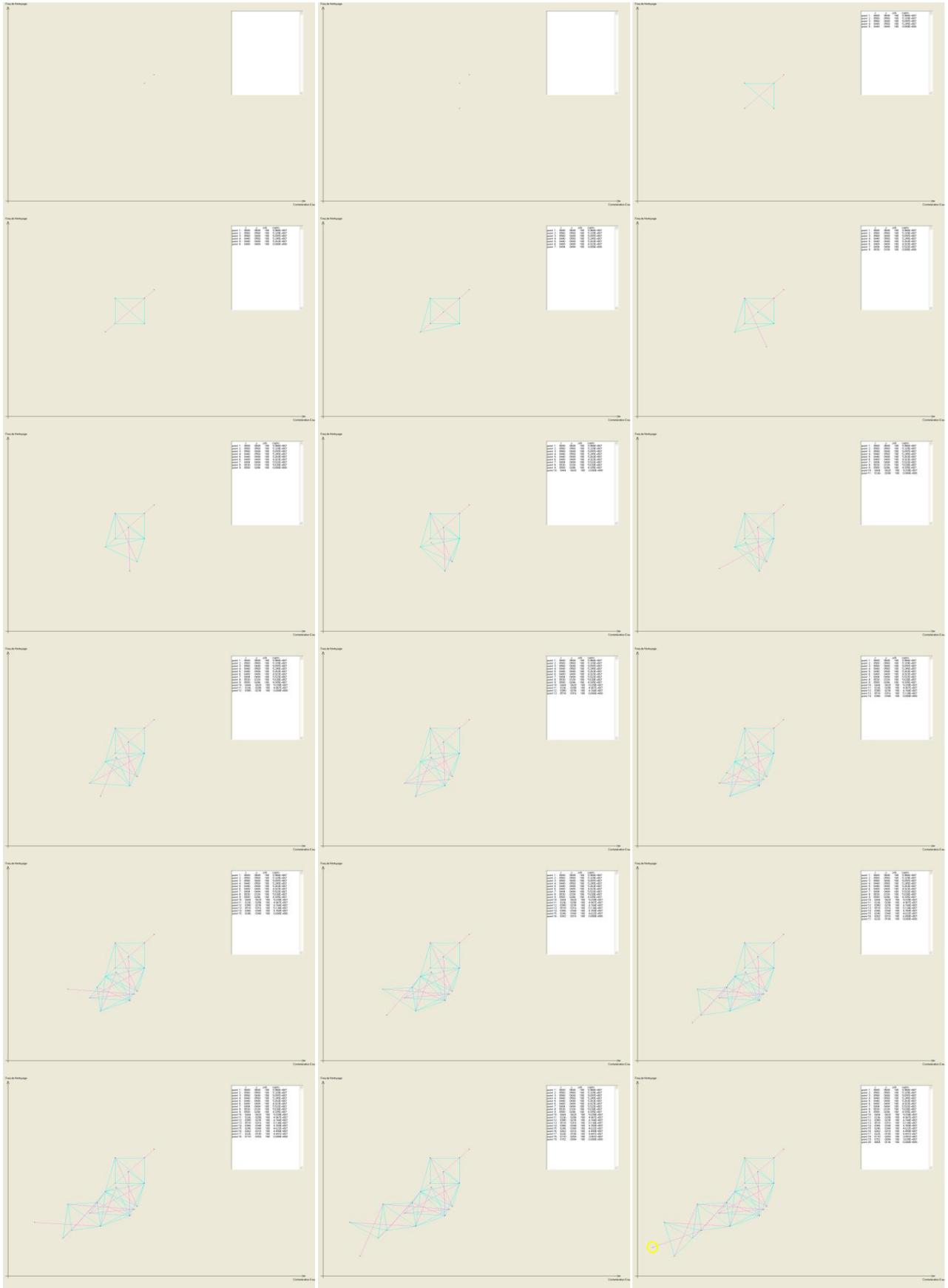
### ↳ Méta-scénario A : résultats représentatifs de la plupart des cas obtenus

NB : Le cercle jaune repère le dernier point trouvé par le méta-système

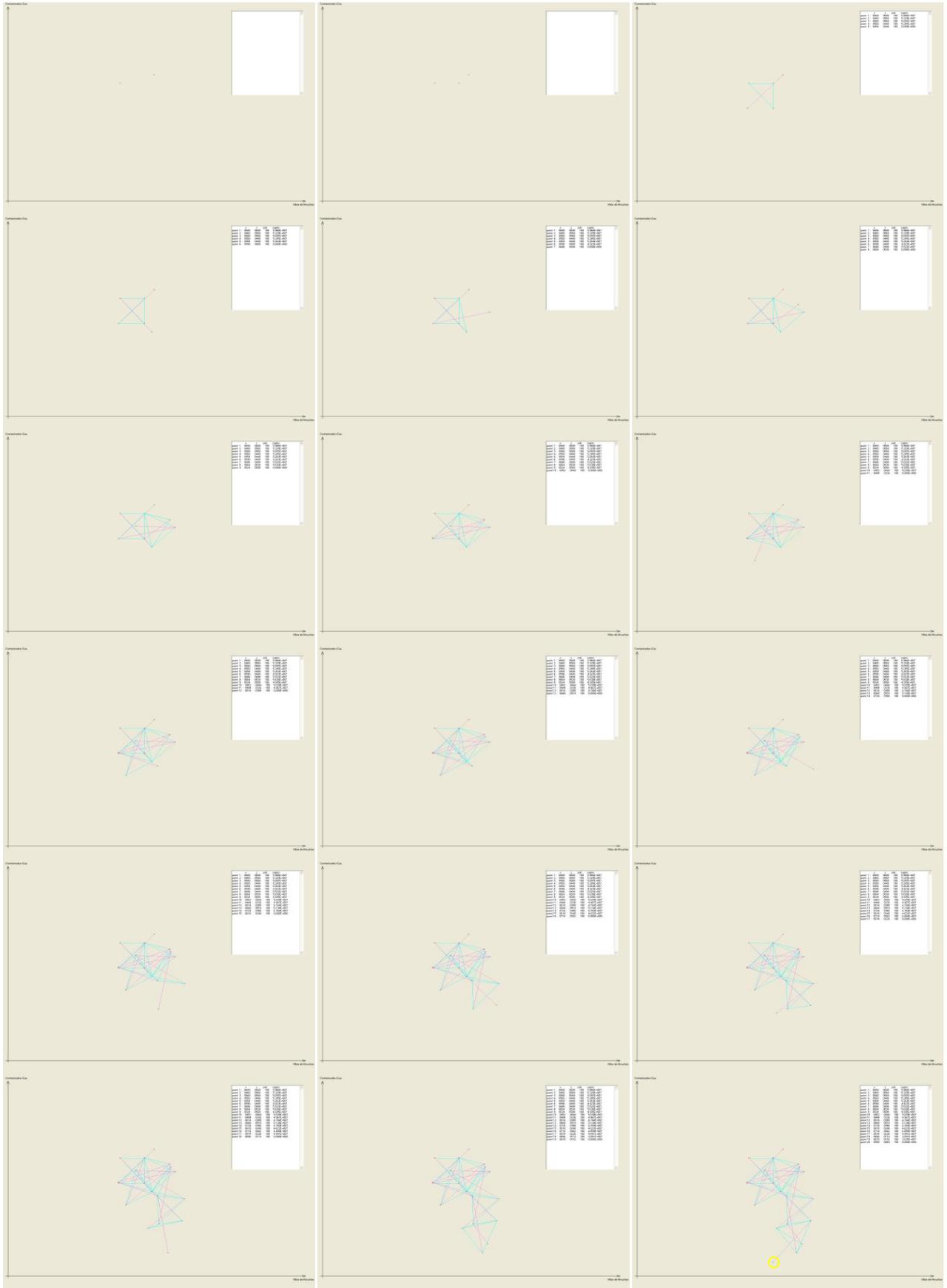
- Résultats dans le plan Nbre de mouche / Fréq. de nettoyage (X / Y)



- Résultats dans le plan Conta. de l'eau / Fréq. de nettoyage (Z / Y)

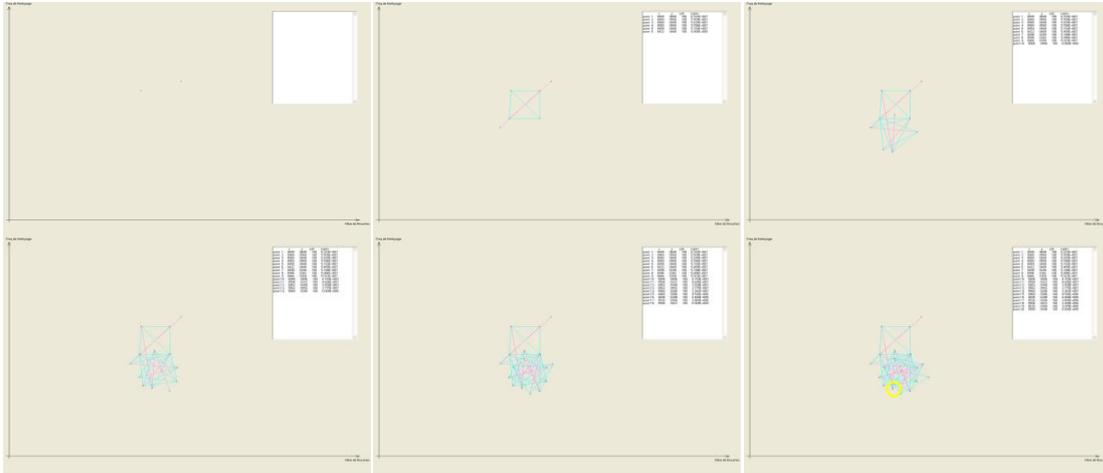


- Résultats dans le plan Nbre de mouche / Conta. de l'eau (X / Z)



↳ *Méta-scenario A bis : résultats obtenus dans une moindre mesure*

- Résultats dans le plan Nbre de mouche / Fréq. de nettoyage (X / Y)



- Résultats dans le plan Conta. de l'eau / Fréq. de nettoyage (Z / Y)



- Résultats dans le plan Nbre de mouche / Conta. de l'eau (X / Z)



↳ *Méta-scenario B1 (10 Vaches + 10 Veaux):*

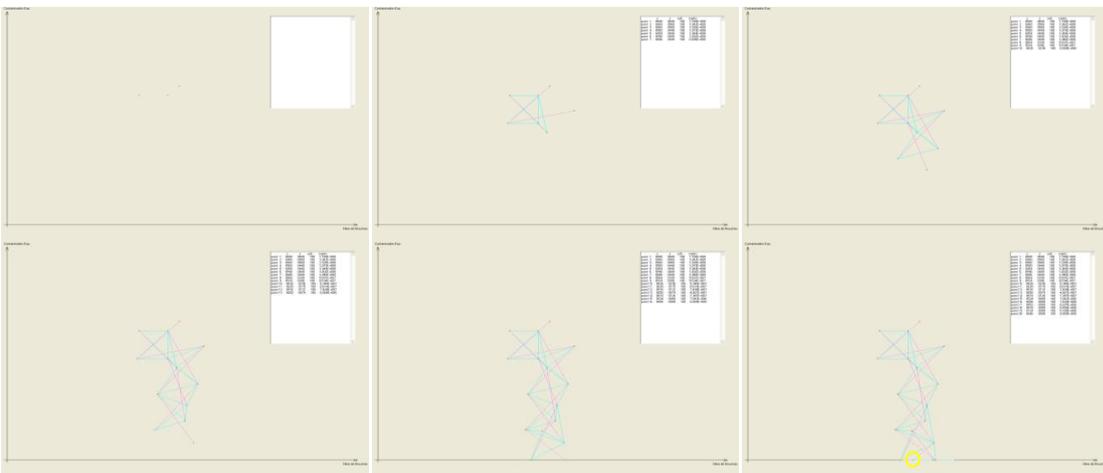
- Résultats dans le plan Nbre de mouche / Fréq. de nettoyage (X / Y)



- Résultats dans le plan Conta. de l'eau / Fréq. de nettoyage (Z / Y)

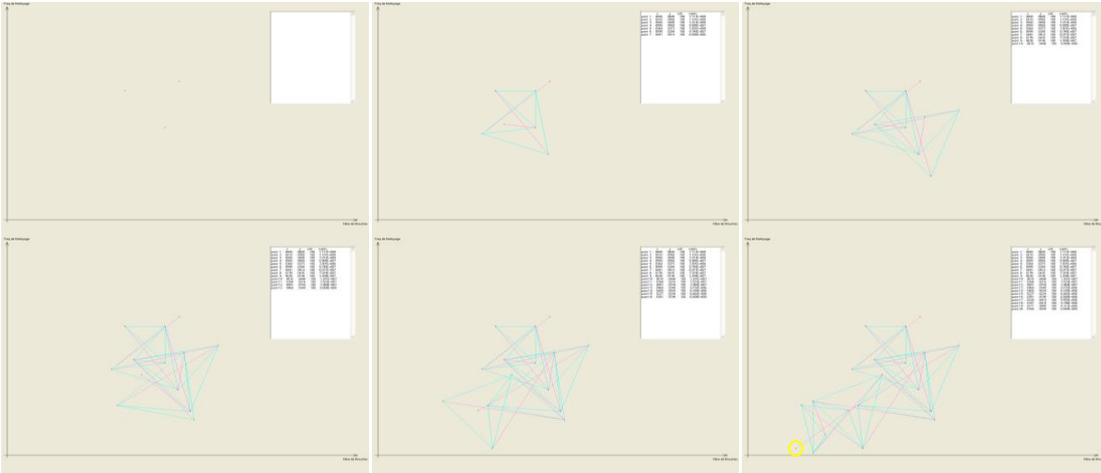


- Résultats dans le plan Nbre de mouche / Conta. de l'eau (X / Z)



↳ *Méta-scenario B1 avec optimisation de la taille du simplexe:*

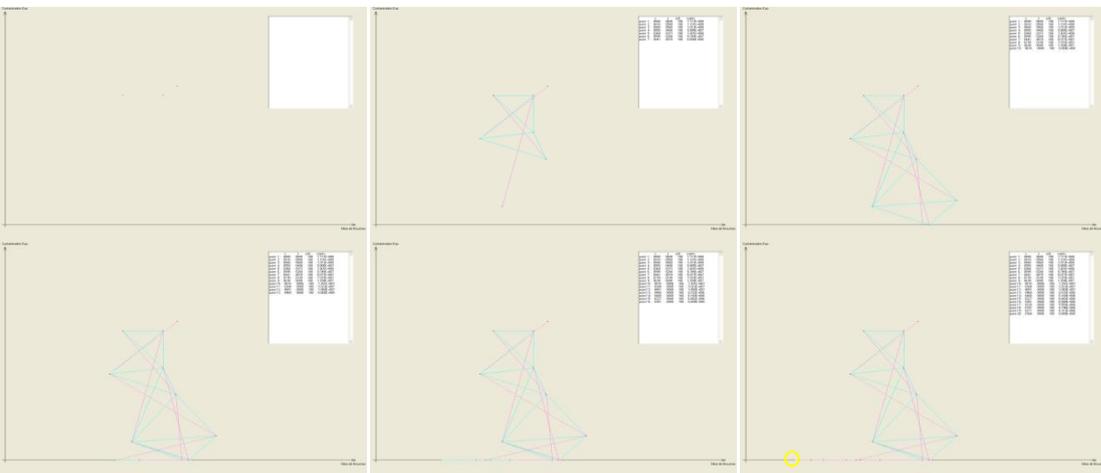
- Résultats dans le plan Nbre de mouche / Fréq. de nettoyage (X / Y)



- Résultats dans le plan Conta. de l'eau / Fréq. de nettoyage (Z / Y)



- Résultats dans le plan Nbre de mouche / Conta. de l'eau (X / Z)

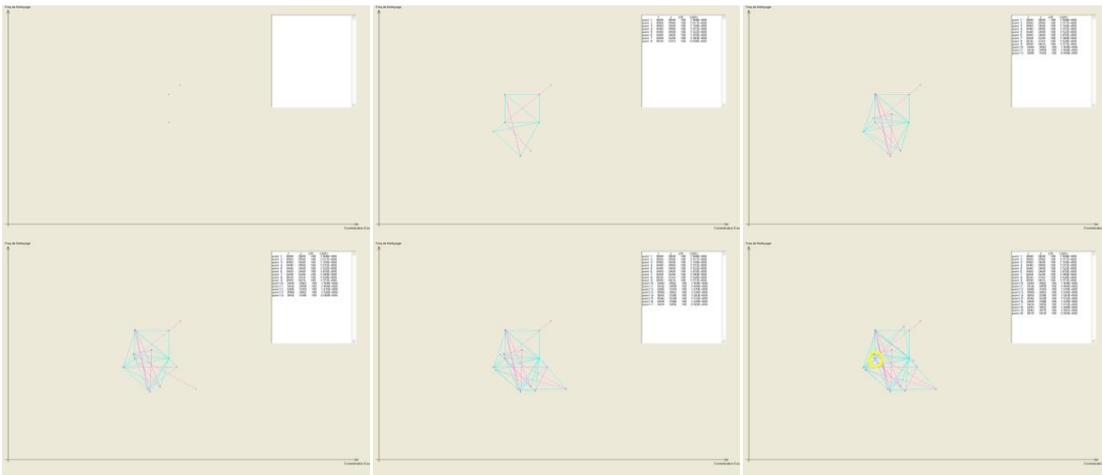


↳ *Méta-scenario B2 (8 Vaches + 8 Veaux) :*

- Résultats dans le plan Nbre de mouche / Fréq. de nettoyage (X / Y)



- Résultats dans le plan Conta. de l'eau / Fréq. de nettoyage (Z / Y)



- Résultats dans le plan Nbre de mouche / Conta. de l'eau (X / Z)

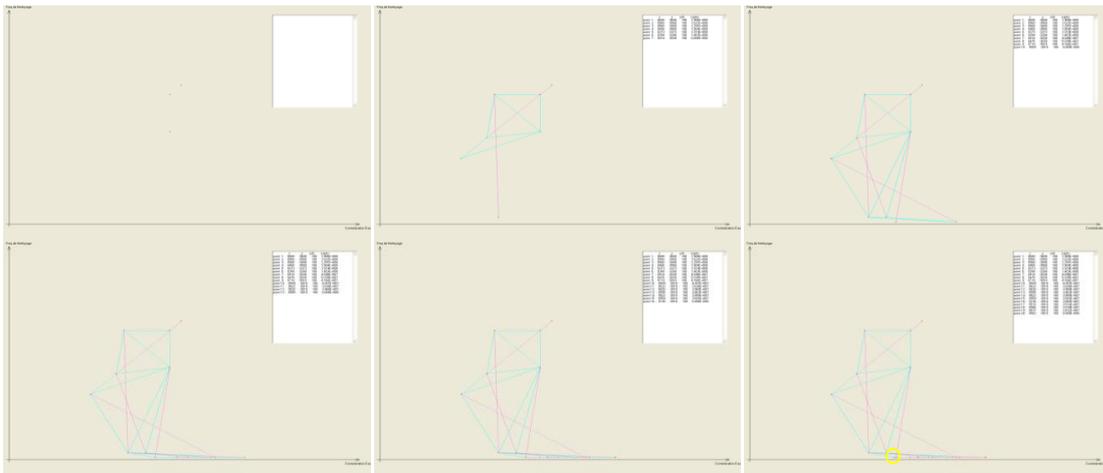


↳ *Méta-scenario B2 optimisé:*

- Résultats dans le plan Nbre de mouche / Fréq. de nettoyage (X / Y)



- Résultats dans le plan Conta. de l'eau / Fréq. de nettoyage (Z / Y)



- Résultats dans le plan Nbre de mouche / Conta. de l'eau (X / Z)

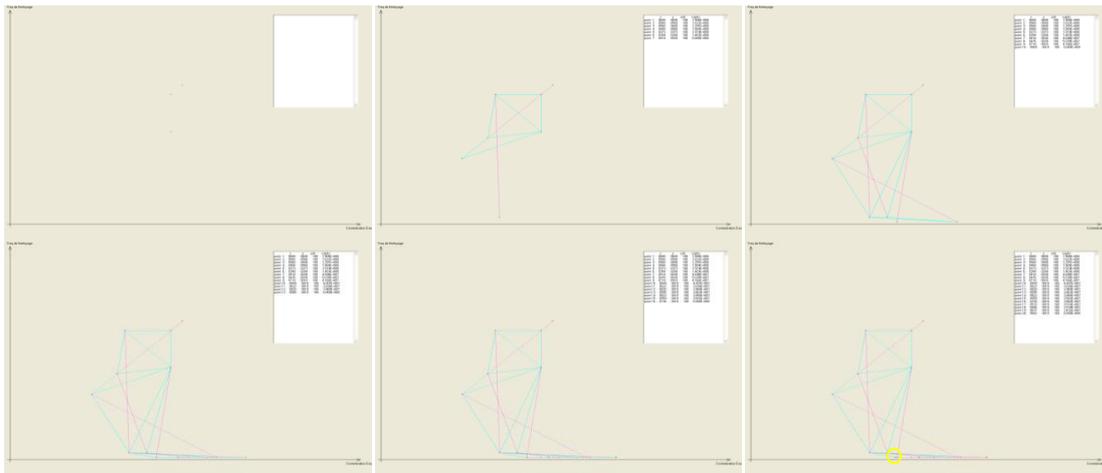


↳ Méta-scénario B2 optimisé:

- Résultats dans le plan Nbre de mouche / Fréq. de nettoyage (X / Y)



- Résultats dans le plan Conta. de l'eau / Fréq. de nettoyage (Z / Y)



- Résultats dans le plan Nbre de mouche / Conta. de l'eau (X / Z)



↳ *Méta-scénario C1 :*

- Résultats dans le plan Nbre de mouche / Fréq. de nettoyage (X / Y)



- Résultats dans le plan Conta. de l'eau / Fréq. de nettoyage (Z / Y)



- Résultats dans le plan Nbre de mouche / Conta. de l'eau (X / Z)



↳ *Méta-scenario C1 optimisé :*

- Résultats dans le plan Nbre de mouche / Fréq. de nettoyage (X / Y)



- Résultats dans le plan Conta. de l'eau / Fréq. de nettoyage (Z / Y)



- Résultats dans le plan Nbre de mouche / Conta. de l'eau (X / Z)

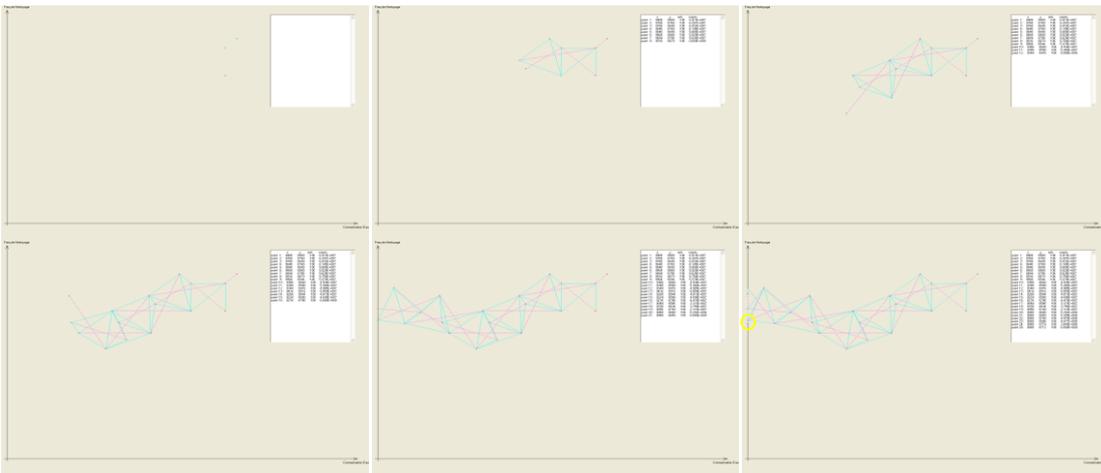


↳ *Méta-scénario C2 :*

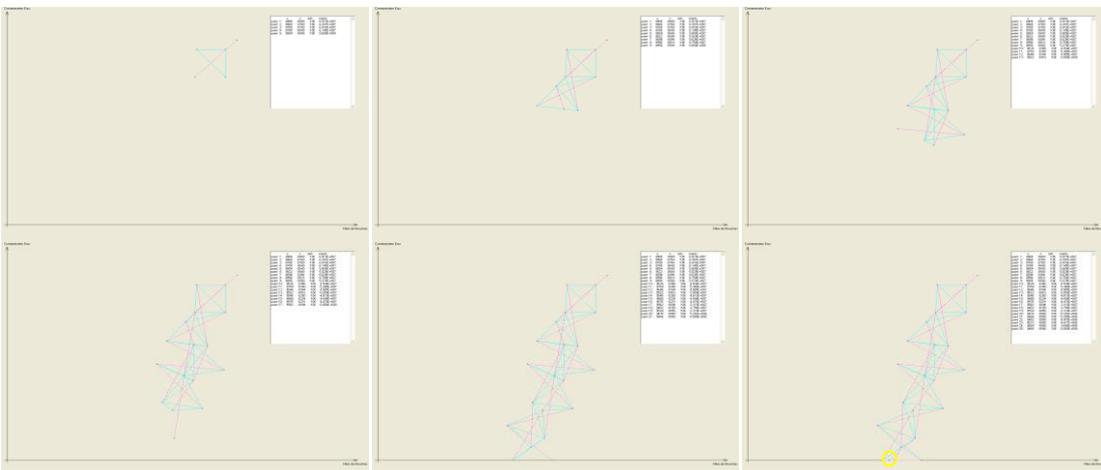
- Résultats dans le plan Nbre de mouche / Fréq. de nettoyage (X / Y)



- Résultats dans le plan Conta. de l'eau / Fréq. de nettoyage (Z / Y)

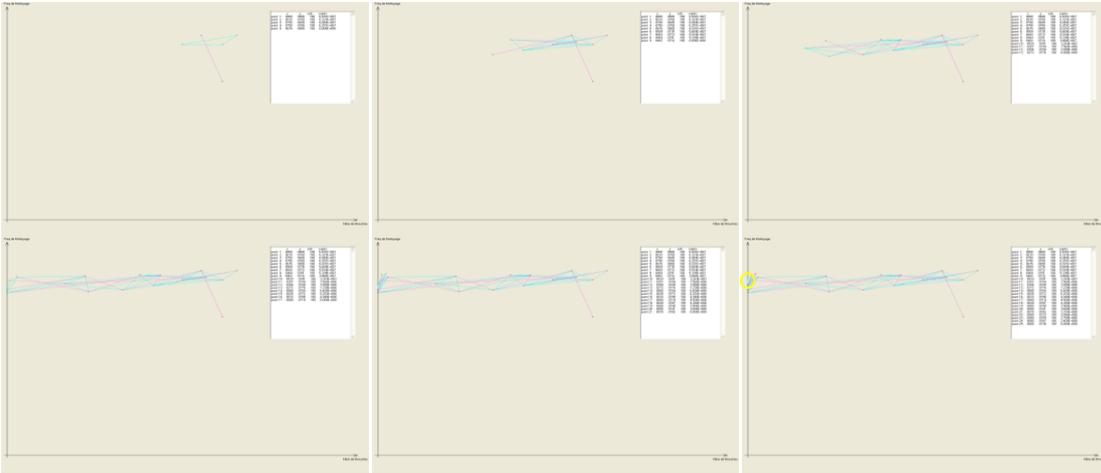


- Résultats dans le plan Nbre de mouche / Conta. de l'eau (X / Z)



↳ Méta-scénario C2 optimisé :

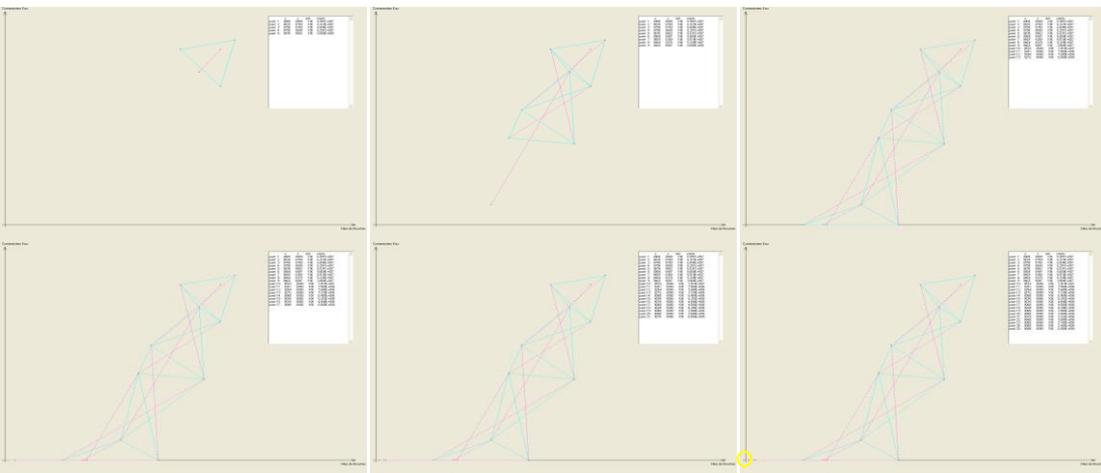
- Résultats dans le plan Nbre de mouche / Fréq. de nettoyage (X / Y)



- Résultats dans le plan Conta. de l'eau / Fréq. de nettoyage (Z / Y)

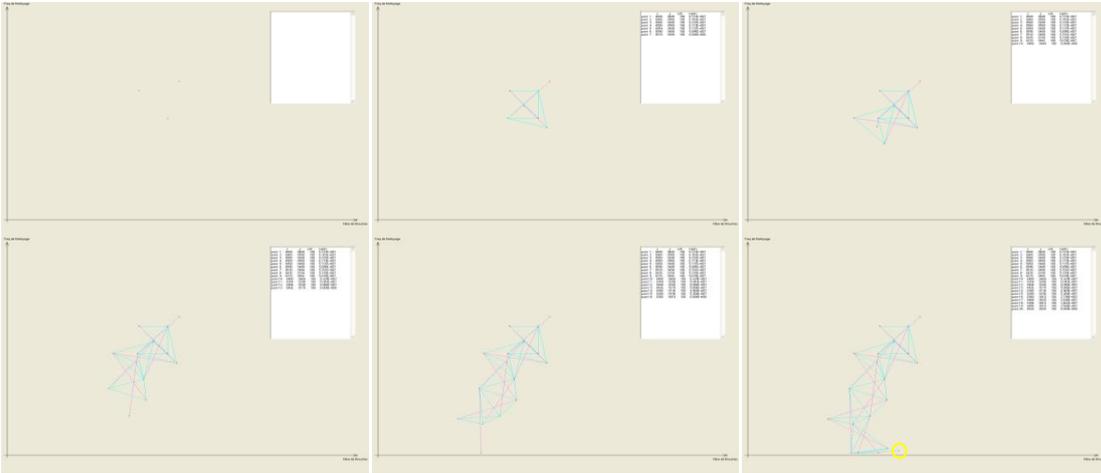


- Résultats dans le plan Nbre de mouche / Conta. de l'eau (X / Z)



↳ *Méta-scenario D1 :*

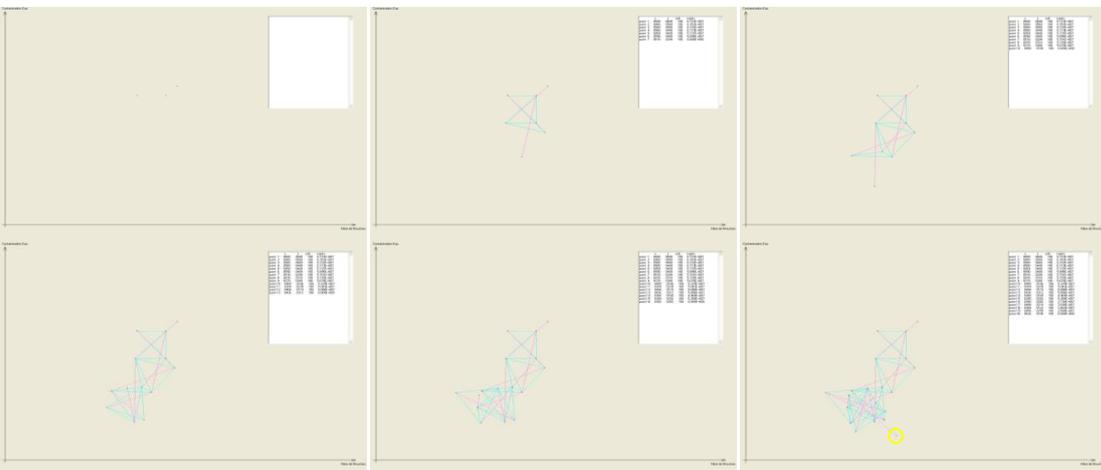
- Résultats dans le plan Nbre de mouche / Fréq. de nettoyage (X / Y)



- Résultats dans le plan Conta. de l'eau / Fréq. de nettoyage (Z / Y)



- Résultats dans le plan Nbre de mouche / Conta. de l'eau (X / Z)



↳ *Méta-scenario D2 :*

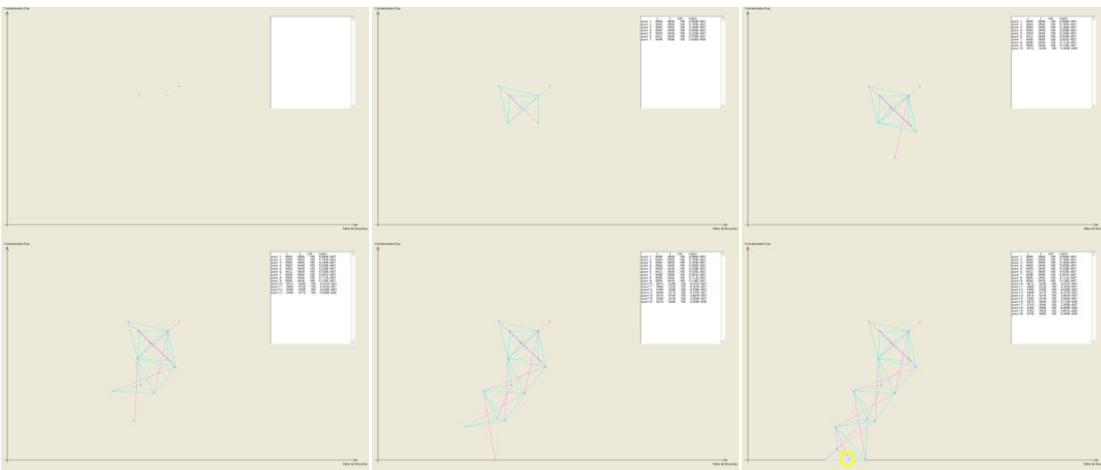
- Résultats dans le plan Nbre de mouche / Fréq. de nettoyage (X / Y)



- Résultats dans le plan Conta. de l'eau / Fréq. de nettoyage (Z / Y)



- Résultats dans le plan Nbre de mouche / Conta. de l'eau (X / Z)



## *Annexe 5 Publications*

Alexandre Weber, Daniel Dupont, Anne Follet, Philippe Kubiak, Ahmed Rahmani, « **Modélisation et gestion de flux par système multiagents : application à un système d'aide à la décision en épidémiologie** », Code article : 160, CIFA 2006 *Conférence internationale francophone d'automatique*, 30,31 mai et 1<sup>er</sup> juin 2006, ENSEIRB, Bordeaux, France.

Alexandre Weber, Daniel Dupont, Anne Follet, Philippe Kubiak, Ahmed Rahmani, « **Multiagent System for Flow Management in Complex Systems: Development of a Decision-support System in Epidemiology** », p. 73 Ref. ENV-02, ESM 2006, *The 20<sup>th</sup> annual European Simulation and Modelling Conference*, 23-25 octobre 2006, LAAS, Toulouse, France.