



Le statut épistémologique de la simulation

**10èmes journées de Rochebrune :
Rencontres interdisciplinaires sur les systèmes
complexes naturels et artificiels**

26 janvier au 3 février 2003

Organisées avec le soutien

de l'European Conference on Artificial Life (ECAL)
du Centre de Coopération International en Recherche
Agronomique pour le Développement (CIRAD)

Sous le patronage

de l'Association pour la Recherche Cognitive (ARCo)
de l'Association Française d'Intelligence Artificielle (AFIA)

ENST 2003 S 001

Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications

Le statut épistémologique de la simulation

10èmes journées de Rochebrune : Rencontres interdisciplinaires sur les systèmes complexes naturels et artificiels

26 janvier au 3 février 2003

Organisées avec le soutien
de l'European Conference on Artificial Life (ECAL)
du Centre de Coopération International en Recherche
Agronomique pour le Développement (CIRAD)

Sous le patronage
de l'Association pour la Recherche Cognitive (ARCo)
de l'Association Française d'Intelligence Artificielle (AFIA)

ENST 2003 S 001

Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications

10èmes Journées de Rochebrune : Janvier 2003

(Rencontres interdisciplinaires sur les systèmes complexes naturels et artificiels)

Le statut épistémologique de la simulation

Ces journées sont dédiées à la mémoire de Jean-Marc Fouet et de Clairette Karakash

**Avec le soutien de l'ECAL et du CIRAD
Sous le patronage de l'ARCo et de l'AFIA**

Qu'est-ce que Rochebrune ?

Ce n'est pas par hasard que Rochebrune est essentiellement un lieu. Hors de toutes contraintes institutionnelles, Rochebrune est le lieu du doute et donc du questionnement de nos pratiques scientifiques en prise avec les systèmes complexes du physique au social. C'est, de ce fait, un lieu privilégié du dialogue interdisciplinaire qui permet à chacun d'ouvrir ses perspectives en interaction soutenue avec les autres. Ceci ne peut se faire que dans un lieu physique approprié et depuis 1992, il s'agit d'un chalet isolé et chaleureux qui nous accueille au sommet des pistes de Megève (Haute-Savoie) créant ainsi le vase clos indispensable à l'alchimie du dialogue.

Le thème

De plus en plus dans l'étude des systèmes complexes naturels et artificiels, on fait appel à la simulation. Dans les domaines scientifiques, la simulation a évolué de la simple résolution numérique des équations à un véritable outil de théorisation appliqué à tous les domaines de la science de la physique à la sociologie. L'objectif de ces journées est d'interroger la nature de cette pratique qui est relativement nouvelle en science même si on peut s'interroger sur son ancienneté en général, des mythes à la littérature, y compris la science-fiction. De nombreuses questions se posent :

- Que couvre la simulation ? Des équations différentielles aux simulations individus-centrées en passant par les modèles à compartiments et les automates cellulaires : quand est-ce que l'on peut parler vraiment de simulation ? Quels genres de systèmes adresse la simulation ? Que prennent en compte ou pas les différentes approches ? En quoi la simulation est la seule possibilité ou quelle est sa complémentarité à d'autres théorisations ?
- Quels sont les usages de la simulation ? De la compréhension des phénomènes à l'aide à la décision, avons-nous affaire aux mêmes types de simulation et comment s'articulent-ils ? Jusqu'où comprendre l'aide à la décision ? Qu'en est-il de son usage heuristique, c'est-à-dire comme aide à la découverte scientifique ?
- En ce qui concerne la simulation pour comprendre, en quoi la simulation peut-elle ou pas être considérée comme une théorie scientifique à part entière ? Si c'est le cas, pourquoi ? Si ce n'est pas le cas, à quelle condition en serait-elle une ? Toute simulation requiert une description des processus à dérouler : cette description a-t-elle le statut de modèle ?
- En ce qui concerne la simulation comme aide à la décision, qu'apporte la simulation dans les dynamiques décisionnelles collectives ? Quelles sont les conditions sous lesquelles la simulation constitue un support adéquat ? Qu'en est-il de sa neutralité ou non-neutralité ? Quelle articulation avec la simulation pour comprendre ? Quel rôle de la simulation pour l'aide à la décision dans les processus d'ingénierie de systèmes ? Quelles économies

d'échelle pouvant être apportées par l'utilisation de la simulation pour l'aide à la décision, par rapport à des prototypages non virtuels, ou des essais grandeur nature ? Qu'en est-il de la vérification, validation et accréditation des simulations (problème de la confiance à accorder, de la fiabilité d'une simulation, etc.) ?

- Les simulations citées précédemment font implicitement référence aux simulations informatiques ? Quelle articulation avec d'autres formes de simulation que ce soit la science fiction, les représentations rituelles ou théâtrales, les dynamiques de groupe ? Peut-on et à quelles conditions, les considérer comme des simulations ?

Comité de programme

Pierre Beust (GREYC, Caen)
Jacques Blanc-Talon (ECTA, Arcueil)
Danièle Bourcier (MSH, Paris)
Guillaume Deffuant (CEMAGREF, Clermont-Ferrand)
Alexis Drogoul (LIP6, Paris)
Wolf-Dieter Eberwein (WZB, Berlin)
Hervé Glotin (ERSS, Toulouse)
Dominique Luzeaux (ECTA, Arcueil)
Jean-Pierre Müller (CIRAD, Montpellier), Président
Anne Nicolle (GREYC, Caen)
Christophe Parisse (INSERM, Paris)
Francis Rousseaux (IRCAM, Paris)
Miriam Scaglione (EHL, Lausanne)
Christiane Weber (Image&Ville, Strasbourg)
Gérard Weisbuch (ENS, Paris)

Comité d'organisation

Guillaume Deffuant (CEMAGREF, Clermont-Ferrand)
Jean-Louis Dessalles (ENST, Paris)
Thierry Fuhs (Hightel, Paris)
Hervé Glotin (ERSS, Toulouse)
Jean-Pierre Müller (CIRAD, Montpellier), Président

Evelyne Andreewsky	Principe d'imitation, lecture et interdisciplinarité
Filipe Borgès, Danièle Bourcier	Le juge connexioniste: de la simulation à la justification
Roger Cozien	Le laboratoire de Brillouin
Guillaume Deffuant, Frédéric Amblard, Raphael Duboz, Eric Ramat	Une démarche expérimentale pour la simulation individus-centrée
Alexis Drogoul, Diane Vanbergue, Thomas Meurisse	Simulation orientée agent: où sont les agents?
Jacques Ferber, Véronique Guerrin	Représentations et simulation: de la modélisation à la mise en situation
Vincent Ginot	Exploration numériques des propriétés d'un modèle
Jerzy Karczmarczuk	Peut-on simuler un système quantique
Hubert Kieken	Le rôle des modèles dans la gestion de l'environnement
Thomas Meurisse	L'importance des modèles dans la conception de simulations
Fabien Michel, Jacques Ferber	Interactions fortes et interactions faibles dans les simulation multi-agents
Pascale Nardone	La simulation en physique
Pascale Nardone, Françoise Decortis	La simulation: vers une épistémologie du dialogue interactif
Silvie Occelli	La simulation pour la modélisation des systèmes urbains
Denis Phan	Niveaux d'abstraction, transdisciplinarité et modélisation objet des interactions multi-agents sur des réseaux
Francis Rousseaux	Informatique et simulation
Serge Stinckwich	L'anticipation dans les systèmes complexes: conséquences pour la simulation
Mamadou K. Traoré, David R.C. Hill	Réflexions sur la Théorie de la Simulation
Franck Varenne	La simulation conçue comme expérience concrète

Principe d'imitation, lecture, et interdisciplinarité

Evelyne Andreewsky
<andreews@ext.jussieu.fr>

Dans les années 60, Michael Bongard (Acad. Sciences, Moscou) a formulé un principe très général, qui s'applique à tout problème de reconnaissance. Selon ce principe, pour déterminer si tel objet appartient à telle ou telle classe donnée, il est nécessaire d'*imiter* le processus qui a généré cet objet.

Seront présentées: une approche de la reconnaissance de l'écriture manuscrite ancrée dans ce principe, et une simulation fonctionnelle de l'initialisation de la compréhension de l'écrit, imitant assez étroitement un syndrome alexique classique.

I. - De la pathologie de la lecture à la reconnaissance automatique de l'écriture manuscrite.

Alexandre Luria (le neurologue russe fondateur de la Neuropsychologie), misait sur l'interdisciplinarité. Ses séminaires étaient suivis non seulement par des neurologues et des psychologues, mais aussi par des physiciens, des mathématiciens ou des informaticiens de l'Académie des Sciences de Moscou. Il considérait les observations des pathologies du langage - aphasies ou alexies (pathologies liées à des lésions focales du cerveau) comme des moyens irremplaçables permettant de mieux comprendre les composants du langage proprement dit - ces lésions devenant en quelque sorte des expériences *in vivo* sur notre système cognitif.

Les systèmes d'intelligence artificielle pour le traitement du langage permettent de modéliser certains de ces composants - et dans la mesure où de tels systèmes sont confrontés à un certain nombre de problèmes communs avec notre système cognitif - à savoir, tous les problèmes inhérents au langage, on peut considérer les traitements automatiques du langage comme autant d'expériences *in vitro* concernant les processus cognitifs.

I. 1 - Vers une interprétation dynamique des items manuscrits

De nombreux cas d'alexie, mettant en évidence des composants spécifiques de la lecture, ont été présentés dans ces séminaires interdisciplinaires. Un de ces cas concernait un patient qui, à la suite d'une lésion cérébrale, était devenu parfaitement incapable de lire. Il ne pouvait pas plus reconnaître un caractère alphabétique qu'un mot, ni énoncer un quelconque item écrit. En essayant de rééduquer ce patient, on

s'aperçut qu'il pouvait reconnaître les items manuscrits, dans la mesure où il traçait ces items avec son doigt. Au bout d'un mois, il arrivait à lire en traçant ces items en l'air, puis en mettant sa main dans sa poche - et en continuant à les tracer avec son doigt.

Ce cas invite à considérer un pattern manuscrit non seulement comme une *image* mais aussi comme un *mouvement*. Un certain nombre de faits viennent à l'appui de cette idée ; un exemple très simple, mais très convainquant est le suivant : essayez de reconnaître un caractère alphabétique tracé dans votre dos par quelqu'un, avec son doigt. Vous réussirez en général, même si c'est pour la première fois que vous faites une telle expérience. Vous n'avez pas besoin d'une phase d'apprentissage, ni d'un processus logique visant à reconstruire l'image du caractère dans votre esprit. Vous devez simplement interpréter le mouvement.

I. 2 - Reconnaissance automatique de l'écriture manuscrite

L'intérêt de prendre en compte la dynamique du mouvement pour la reconnaissance de l'écrit, mis en évidence ci-dessus, a suscité un projet de reconnaissance automatique de l'écriture manuscrite (dirigé par S. Guberman), basé sur la *description* des images manuscrites en tant que trajectoires (ce projet a ensuite débouché sur un certain nombre de systèmes commercialisés - dont par exemple le "Newton").

Une telle description supprime directement les "bruits" inhérents à l'image d'entrée, et permet de travailler sur un objet plus abstrait. Le langage de description de ces trajectoires est simple ; il est composé d'un alphabet de 7 éléments d_i (cf. Guberman & Andreewky, 1996), et transforme les items manuscrits d'entrée en séquences de d_i .

La reconnaissance des caractères manuscrits est un des tous premiers problèmes que s'est posé l'intelligence artificielle. Mais les diverses approches de ce problème n'avaient jamais été fondées sur la dynamique des items manuscrits, celle qui a conduit à créer ces items - et qui est nécessaire à la reconnaissance, selon le principe d'imitation (cf. ci-dessus). La description proposée, qui s'occupe du mouvement du stylo, est par contre directement ancrée dans ce principe.

II. - Des systèmes d'indexation automatique "simulant" certains comportements aphasiques.

II. 1 - Systèmes d'indexation et syntaxe

Les systèmes d'indexation automatique doivent déterminer les mots clés d'un texte donné. L'ensemble de ces mots clés permet de définir une sorte *d'approximation du "contenu"* de ce texte, très utile pour la documentation

automatique. Pour déterminer les mots clés, vérifier qu'ils appartiennent au thésaurus du domaine considéré, prendre en compte les synonymes, etc., il convient de commencer par repérer les mots "pleins" des phrases du texte considéré, pour les normaliser (singulier, infinitif, etc.) ce qui n'est pas un problème simple, étant donné notamment le grand nombre d'ambiguïtés grammaticales de la langue - ce qu'illustrent les exemples suivants, qui présentent exactement les mêmes *items* - mais pas les mêmes *mots* :

il livre ce lit vs. *il lit ce livre*.

Repérer le verbe *livrer* et le substantif *lit* dans la première phrase, ou le verbe *lire* et le substantif *livre* dans la seconde, implique au moins un traitement *syntactique partiel* de "désambiguation grammaticale", nécessaire (comme le suggèrent ces exemples) pour n'importe quel traitement de ces énoncés.

Il convient de remarquer que les approches linguistiques traditionnelles ne font pas place à des traitements syntactiques *partiels*, comme la désambiguation. Elles se fondent en effet - en contrepoint des conceptions du langage en termes d'éléments premiers - sur des modèles de "*la*" syntaxe *en tout ou rien* (un énoncé est "bien formé" ou non), et la désambiguation d'un énoncé implique le traitement syntactique *complet* de cet énoncé. (l'école de Chomsky est en train d'admettre (Bever, 2001) un tel traitement partiel, baptisé de "pseudo-syntaxe").

- II. 2 - Un stade préliminaire : le sens à "l'état naissant" :

Les composants de l'interprétation de l'écrit sont très difficiles à étudier expérimentalement. Comment par exemple mettre en évidence des *traces* des processus en cours, dans les comportements de lecture habituels, où ces processus sont transparents ? C'est la raison qui nous engage à avoir recours aux comportements alexiques, où de telles traces peuvent parfois se manifester.

C'est en particulier le cas pour certains patients, les *dyslexiques profonds*, dont les comportements semblent refléter des stades préliminaires de la lecture. En effet, tout se passe comme si l'interprétation de l'écrit *s'interrompait* pour ces patients à l'issue d'un *amorçage*, "figeant" le sens des énoncés dans un état que l'on peut qualifier de "naissant" ou de "très approximatif". Les dyslexiques profonds ne reconnaissent pas les caractères alphabétiques isolés, et ne peuvent lire à haute voix que les mots pleins (substantifs et verbes), moyennant un certain nombre d'erreurs consistant essentiellement à énoncer un synonyme ou un mot de signification voisine ("scotch" pour "whisky", par exemple). Les mots fonctionnels, qui ne sont *pas* énoncés, ne sont *pas* identifiés et ne sont pas compris.

La compréhension de ces patients, évaluée à l'aide des tests psychologiques usuels, ne semble pas à première vue totalement perturbée. Énoncer un synonyme à la

place du mot à lire traduit à l'évidence que l'on a, au moins en gros, compris ce mot. Mais aucun des tests de compréhension sur les contraintes syntaxiques des phrases n'est réussi par les patients. Ces tests impliquent en général la prise en compte de ces contraintes pour être en mesure d'associer une phrase (à choisir) à une image donnée ; les patients ne font pas de différence, par exemple, entre formes active et passive, dans la mesure où ils ne peuvent différencier des phrases telles que : "la voiture rouge a dépassé la moto blanche" vs. "la voiture rouge a été dépassée par la moto blanche", pour les associer aux images correspondantes. Ils n'exploitent pas davantage les contraintes liées aux mots fonctionnels, comme "dessus" ou "dessous" dans : "le cercle est au dessus du carré" vs. "le cercle est au dessous du carré" ; ils sont en effet incapables d'associer par exemple le second de ces énoncés plutôt que le premier à l'image d'un cercle surmonté d'un carré. Tous les tests qui comme les précédents explorent le rôle des règles et contraintes syntaxiques dans le sens attribué aux énoncés, se révèlent impossible à effectuer par les patients. Il est en particulier remarquable que les dyslexiques profonds, qui *ignorent* mots fonctionnels ou règles syntaxiques dans leurs tentatives de compréhension de l'écrit, procèdent cependant (implicitement) à certains *traitements syntaxiques* (Ils résolvent en effet les ambiguïtés grammaticales ; les items "lit" et "livre" des exemples précédents (*il livre ce lit* vs. *il lit ce livre*) sont énoncés par les patients comme : /livrer/ (ou *apporter*) et /lit/ (ou *couche*), dans le premier cas, et /lire/ et /livre/ (ou *bouquin*), dans le second. Ces énoncés constituent une *trace* de l'étiquette grammaticale attribuée à chacune des occurrences des items présentés. Ils démontrent par conséquent que (en dépit des modèles traditionnels) une désambiguation est parfaitement susceptible d'intervenir dans les mécanismes cognitifs, en l'absence de tout autre traitement syntaxique...

II. 3 - Le principe d'imitation, l'indexation, et les dyslexiques profonds

D'abord, l'indexation d'un texte donné fournit par définition une approximation du sens de ce texte - d'où son intérêt potentiel pour générer (ou modéliser) les "premières approximations" qui caractérisent la compréhension de l'écrit par les dyslexiques profonds.

Nous allons passer en revue les similarités fortes que l'on peut constater entre indexation automatique (c'est à dire, rappelons-le, la détection et la normalisation des mots clés), et les phénomènes caractérisant les énoncés des dyslexiques profonds en lecture :

II. 3. 1 - Pour déterminer les mots clés d'un texte donné, un système d'indexation doit commencer par sélectionner les mots pleins de ce texte. *Rappelons que les patients énoncent et comprennent exclusivement ces mots.*

II. 3. 2 - La détermination des mots pleins, nous l'avons indiqué au paragraphe précédent, implique une désambiguation syntaxique, étant donné le grand

nombre d'ambiguïtés grammaticales dans la langue. Cette opération est suffisante pour repérer ces mots, et l'indexation ne requiert aucun autre traitement syntaxique. *On a vu que les patients, réputés avoir "perdu" leur syntaxe, étant donné leur impossibilité de réussir les tests syntaxiques, mettaient cependant en oeuvre - à l'instar des systèmes d'indexation - une syntaxe réduite à la désambiguation.*

II. 3. 3 - Dans la mesure où les procédures d'indexation comportent un dictionnaire permettant notamment de pondérer les mots, elles doivent déterminer les racines des mots pleins qui ont été repérés, pour les comparer aux entrées du dictionnaire. *Les dyslexiques profonds n'énoncent pas les mots à lire, mais leur racine, ou encore un mot de même racine.*

II. 3. 4 - Les systèmes d'indexation comportent un thésaurus. Articulé aux entrées du dictionnaire, ce thésaurus permet, pour des raisons évidentes de normalisation, de répartir les mots pleins dans des classes d'équivalence sémantique (tout mot clé du thésaurus représente alors l'ensemble des mots d'une classe donnée: synonymie). *Les patients énoncent souvent des synonymes ou des mots sémantiquement proches du mot à lire ("église" pour "cathédrale", par exemple).*

Tous ces phénomènes militent en faveur d'une théorie de la lecture, impliquant une première étape (où s'arrêtent nos patients). On peut en effet replacer chacun des comportements spécifiques des dyslexiques profonds dans la *logique* fonctionnelle d'une telle étape, *initialisant* la compréhension de l'écrit (alors que pour les approches traditionnelles du langage et de ses pathologies, la présence simultanée de ces comportements chez les mêmes malades n'est que le fruit du hasard).

Les systèmes d'indexation automatique qui simulent ainsi les phénomènes que présentent en lecture les dyslexiques profonds, "imitent" sans doute de fait la genèse de ces phénomènes, à savoir une toute première étape de la lecture, produisant une première ébauche du sens. Une telle hypothèse permet par ailleurs de prendre en compte toute une série de phénomènes courants en lecture, qui ne sont traditionnellement pourvus que d'explications *ad hoc* peu convaincantes.

Le juge connexionniste

De la simulation à la justification

BORGES, Filipe □

BOURCIER Danièle

Laboratoire Informatique Droit Linguistique
Centre de *Théorie du droit* CNRS - Université de Paris 10

Introduction □ simuler le sentiment de justice

La question que nous poserons est celle de l'intérêt de la simulation non seulement pour comprendre mais aussi pour apprendre. À cette fin nous prendrons l'exemple d'une expérience qui a été menée à la Cour d'appel de Versailles en 2002 – donc susceptibles d'avoir dans les prochains mois des effets *réels* sur le fonctionnement de la justice - pour représenter, simuler et justifier les raisonnements du juge dans des contentieux bien définis. Précisons que pour la première fois ce sont les magistrats eux-mêmes qui ont établi collectivement les règles qu'ils étaient censés utiliser dans le cadre de la loi.

Dans un premier temps nous montrerons ce que peuvent nous apprendre les modèles connexionnistes et sur la valeur heuristique de la simulation vis-à-vis de la justification dans le monde du droit. Puis seront discutées les connaissances apportées par les machines qui sont censées simuler le raisonnement humain sur la justice.

1-Réseaux de neurones artificiels (RNA) appliqués au droit □ état des travaux

Les modèles d'intelligence artificielle ont la plupart du temps pour objectif de simuler un raisonnement humain. Mais il faut au

préalable connaître et formaliser les règles qui fondent la décision humaine, et la manière de les utiliser.

Quand il s'agit du droit, on pense généralement que ces règles sont *données* par le législateur.

Or on s'aperçoit qu'on ne peut traduire toute la loi sous forme de règles¹. Même si on le pouvait, on s'apercevrait aussi que les éléments de base de la loi (son ontologie) peuvent être flous ou indéterminés et qu'en réalité, la loi délègue au juge le soin d'ajouter des règles implicites d'interprétation de ces unités face à des cas réels – c'est ce qu'on appelle le pouvoir discrétionnaire du juge. Les RNA sont particulièrement adaptés à ces connaissances floues, incertaines et bruitées. De nombreux tests ont été faits pour utiliser des modèles connexionnistes dans le traitement du droit (Ferhout, 1989) (Bochereau et alii, 1991) et l'on a reconnu leur pertinence pour traiter les parties les plus ouvertes du raisonnement (Bench Capon, 1993) malgré les critiques qui leur sont faites (Warner, 1993).

Leur principal défaut réside dans leur difficulté à exprimer les règles sur lesquelles sont construits leurs résultats.

Dans certains domaines (traitement du signal, traitement de la parole, reconnaissance des visages), l'expérimentateur n'a pas besoin de savoir quel pixel ou quel neurone a fait basculer la décision du réseau. En revanche la justification est fondamentale en droit, à la fois pour le magistrat et pour les parties.

2-- Simuler la décision pour analyser la justification

2.1- Obstacle – la dispersion de l'information dans la structure

La lecture d'un arrêt montre que le juge justifie généralement *en citant les éléments de faits ou de droit qui ont orienté sa décision*. Telle clause n'est pas applicable car le contrat de travail prévoyait le paiement d'une contrepartie financière et que celle-ci n'a pas été payée – tel licenciement est sans cause réelle et sérieuse car la lettre de licenciement n'énonce pas de motifs réels et précis – tel privilège de juridiction est écarté car une convention prévoit des règles de compétences particulières. En ce sens, une justification satisfaisante émanant d'un modèle connexionniste consisterait à ce qu'il nous informe des éléments de faits ou de droit (critères) qui ont fait basculer sa décision.

¹ Il reste notamment les principes qui nécessitent une autre représentation

Actuellement, ce modèle peut tout au plus (pour ce qui est des perceptrons) exposer les critères d'entrées et montrer que leur combinaison a eu tel effet en sortie. Il ne s'agit pas d'une justification mais simplement d'une description.

Mais ce qui est aisé pour un système-expert (comme justifier son raisonnement) ne l'est pas pour un réseau de neurones, et ce, pour une raison de structuration de la connaissance. Le réseau de neurones disperse l'information à travers sa structure et le poids de ses connexions. Ceci rend particulièrement complexe la procédure de récupération des informations pertinentes.

2.2- Tracer le signal dans la structure

L'action du perceptron consiste à convertir la valeur de ses entrées en un signal qui se propage le long de ses connexions. Ce signal subit plusieurs traitements mathématiques (notamment dans notre cas le passage par une fonction sigmoïde) et finit par être envoyé par le neurone de sortie sous la forme d'une valeur que l'expérimentateur peut interpréter.

Toute la difficulté consiste en fait à comprendre la façon dont se *propage* le signal global et à détecter rétroactivement comment chaque neurone a agi sur ce signal. De cette façon, l'on espère remonter aux entrées du réseau et déterminer l'influence de chacune d'entre elles.

Se demander quel est le rôle joué par chaque entrée dans le signal de sortie d'un perceptron ressemble quelque peu à se demander quel est le rôle de chaque affluent dans le débit final d'un fleuve.

Le modèle connexionniste présente des similarités avec cette image, du moins pour ce qui est des connexions qu'il comporte. Mais il présente une complication supplémentaire : l'existence de neurones.

Ces neurones peuvent convertir le signal de telle sorte que si l'on reprend l'image précédente, on peut obtenir des affluents qui, en plus de se croiser sans arrêt les uns les autres, voient leur débit augmenter et diminuer plusieurs fois au cours d'un même voyage : il arrive régulièrement que leur cours s'inverse.

Toutes ces complications justifient l'utilisation de l'informatique pour tracer et mesurer à chaque instant le signal se propageant au sein du réseau de neurones.

L'hypothèse que l'on pose est que dans le cas d'une sortie binaire (allant de 0 à 1), certains neurones ont, via les connexions, tendance à diminuer le signal alors que d'autres ont tendance à l'augmenter. En faisant la somme de l'influence de chaque connexion relative à chaque entrée et en les comparant les unes aux autres, on peut déterminer le sens de l'influence de chaque entrée (le sens global de la source) et l'importance relative de leur influence sur le résultat final.

On pose également l'hypothèse que la justification des critères les plus influents au sein d'un réseau de neurone correspond aux éléments les plus déterminants au sein d'un processus décisionnel, et leur citation suffit à justifier le raisonnement emprunté.

3. Test de l'algorithme

L'algorithme a été implémenté sur un réseau de neurones modélisant un contentieux faisant appel à 14 critères. La conclusion du contentieux est binaire ☐ applicabilité ou non-applicabilité d'une clause de non-concurrence dans un contrat de travail.

Un test sur 30 situations différentes sélectionnées au hasard et comparées avec les justifications proposées par un magistrat ont permis de donner un aperçu des performances de l'algorithme².

Le contentieux qui a été «enseigné» au réseau de neurones est celui de l'applicabilité des clauses de non-concurrence, tel qu'il se présentait en juin 2002.

Celui-ci regroupe 14 critères et se conclut de façon binaire : la clause est applicable ou ne l'est pas.

4 conditions doivent être réunies pour que la clause soit applicable ☐

1. La clause doit avoir été portée à la connaissance du salarié (3 critères)
 - a. Soit par le contrat de travail
 - b. Soit par la convention collective, auquel cas le salarié doit être informé de son existence au plus tard le jour de l'engagement

² L'algorithme de justification proposant un pourcentage d'influence de chaque critère, seuls les plus importants ont été indiqués.

La clause doit protéger les intérêts légitimes de l'entreprise, sans être excessive (regroupant 5 critères)

2. La clause ne doit pas avoir été levée par le salarié (4 critères)
Celui-ci peut la lever si le contrat ou la convention collective prévoyait le paiement d'une contrepartie financière et que celle-ci n'a pas été payée
3. La clause ne doit pas avoir été levée par l'employeur (2 critères)
4. Celui-ci peut la lever si une telle procédure est prévue dans le contrat de travail ou dans la convention collective

Si l'une de ces 4 conditions n'est pas validée, la clause n'est pas applicable.

4-- Résultats et observations

Les résultats se présentent sous la forme d'une liste reprenant l'ensemble des critères et affectant à chacun un pourcentage correspondant à l'influence relative qu'a eue chaque critère dans le processus décisionnel. Dans chaque exercice, l'algorithme a montré qu'il parvenait à reconnaître sans erreur les critères qui avaient eu une influence positive sur le contentieux (clause applicable) de ceux qui avaient une influence négative (clause non-applicable).

En ce sens, cette méthode de justification peut être utilisée pour sélectionner une première série de critères pertinents qui vont servir de base à la justification.

L'algorithme de justification permet également de dresser une liste des critères pertinents hiérarchisés en fonction de leur impact sur le processus décisionnel. Cependant, cette hiérarchie ne correspond pas systématiquement à la liste hiérarchique des justifications-témoins (justificateur humain). Ceci peut s'expliquer de deux façons.

4.1 - Mettre en évidence des processus cognitifs plus fins

Certains processus cognitifs intervenant dans notre propre processus de justification permettent de sélectionner un certain nombre de critères parmi tous ceux qui peuvent intervenir dans le processus décisionnel.

Ces critères sélectionnés sont parfois les plus importants, parfois les plus appropriés par rapport à la demande de justification.

On peut ainsi identifier certaines règles de justification³ □

Opéran de ⁴	Valeur	Justification minimale attendue	Justification maximale attendue
ET	VRAI	Tous les opérandes	Tous les opérandes
ET	FAUX	Un opérande faux	Tous les opérandes faux
OU	VRAI	Un seul opérande vrai	Tous les opérandes vrais
OU	FAUX	Tous les opérandes	Tous les opérandes
XOR	VRAI	L'opérande vrai	Tous les opérandes
XOR	FAUX	2 opérandes de même valeur	Tous les opérandes faux

D'un point de vue strictement mathématique, les valeurs de tous les opérandes justifient le résultat, mais l'observateur lambda attendra des opérandes spécifiques.

Prenons le cas d'un opérateur OR reliant deux opérandes. Si les deux opérandes sont vrais, une seule permet de justifier le résultat. L'algorithme de justification citera les deux critères en hiérarchisant (ils auront sensiblement la même valeur).

En revanche, dans le cas de l'opérateur XOR, si un opérande est vrai et un second est faux, le résultat est vrai. Mais un juge aura tendance à justifier le résultat en ne citant que l'opérande vrai. Ceci est une erreur, car l'opérande faux est aussi important pour le résultat que l'opérande vrai. L'algorithme de justification citera à nouveaux les deux critères en les hiérarchisant, et en donnant éventuellement un léger avantage au critère négatif. Ce léger surcroît d'importance n'est pas déterminant, mais suffit à laisser penser que l'algorithme de justification s'est trompé. Mais seule l'imprécision de nos processus cognitifs de justification est à l'origine de l'erreur.

³ Ce tableau est extrait des règles de justification qui ont permis d'élaborer la justification des systèmes-experts développés et décrits précédemment.

⁴ On rappelle que pour que le résultat issu d'un opérateur ET soit vrai tous les opérandes doit l'être également (SI j'ai le diplôme ET j'ai passé le concours ALORS je peux exercer le métier correspondant). L'opérateur OU ne nécessite qu'un seul opérande vrai, mais plusieurs peuvent l'être (SI l'infracteur a commis un crime OU l'infracteur a commis un délit ALORS il est passible d'une peine de prison. L'opérateur XOR par contre demande à ce qu'un seul opérande soit vrai mais pas plusieurs (SI je suis à l'université XOR, je suis à la cour ALORS je travaille, mais je ne peux travailler aux deux endroits à la fois)).

En fait, il fonctionne suffisamment bien pour nous inciter à remettre en cause la validité de nos propres règles de justification.

4.2- Acquérir des règles de comportements humains

Il arrive que l'algorithme de justification n'attribue pas à certains critères l'importance qu'ils méritent.

Après vérifications des justifications-témoins, certains critères voient leur influence surévaluée et certains autre leur influence sous-évaluée.

Plus troublant encore, dans le contentieux modélisé, le modèle accorde régulièrement une importance démesurée à un au critère, alors que dans l'état du droit en vigueur au moment de l'expérimentation, ce critère nécessitait la combinaison d'au moins deux autres critères afin de jouer un rôle déterminant. Dans certaines combinaisons, son influence est presque comparable à celle des critères fondamentaux qui peut faire basculer la décision à eux-seuls.

Des vérifications de l'algorithme de justification ont permis de conclure que ce problème de hiérarchisation était dû au mode d'apprentissage du perceptron.

Lorsqu'une série d'exercice est enseignée à un réseau de neurones dans la phase d'apprentissage, celui-ci va développer une capacité de généralisation à de nouveaux exercices qui ne lui avaient pas été présentés jusqu'alors, c'est-à-dire qu'il saura résoudre correctement de nouveaux cas si ces derniers présentent une certaine ressemblance avec les exercices qu'il aura préalablement appris.

En fait, la phase d'apprentissage consiste à trouver une logique, un 'chemin' qui satisfasse tous les exercices qui lui sont présentés. Le fait d'apprendre cette logique permet au modèle d'être utilisé dans des cas nouveaux impliquant de nouvelles combinaisons des mêmes critères.

Mais que se passe-t-il lorsque plusieurs chemins permettent d'aboutir au même résultat? Par exemple, soit la règle \square SI A est VRAI OU B est VRAI ALORS C est VRAI \square si C est effectivement validé, on peut l'expliquer par 3 'chemins' différents \square

- A était vrai
- B était vrai
- A et B était vrai

Si ce cas est soumis à un réseau de neurones, il va sélectionner l'une des 3 solutions qui a donc 2 chances sur 3 d'être différente de celle que l'expérimentateur a choisi.

Le Perceptron va emprunter le chemin qui lui semble le plus cohérent, au regard des autres exercices de sa base d'apprentissage. Mais il est 'minimaliste'. S'il peut utiliser un autre critère pour parvenir à ses fins sans contredire sa base d'apprentissage, alors il ne cherchera pas à renforcer le poids d'autres critères. S'il dispose d'une voie bien tracée, il n'empruntera pas les sentiers «caillouteux».

Ainsi, les défauts de hiérarchisation des critères peuvent s'expliquer par le fait que le réseau de neurones a utilisé un 'raccourci' lui permettant de généraliser de façon à obtenir de bons résultats sur la totalité des exercices (les 16000 combinaisons ont été testées dans le cas de l'applicabilité de la clause de non-concurrence). Le réseau de neurones a pu se servir de sa puissance de généralisation de façon à échapper à la justification que l'on voulait lui imposer et à trouver, au moyen des autres critères d'entrée, une nouvelle manière cohérente de parvenir à un résultat satisfaisant. En utilisant d'autres critères de façon fortuite il a découvert un autre chemin logique lui permettant de parvenir au résultat souhaité par l'expérimentateur.

Mais, son apprentissage n'est pas aussi aléatoire que l'exemple précédent le laisse supposer. De nombreux exercices viennent l'encadrer et permettent au modèle de se faire une idée très précise des 'rapports de force' entre les différents critères.

Par conséquent la précision de l'algorithme de justification est directement liée à la précision de la base d'apprentissage.

Il est possible aussi que la réduction des neurones présents en couche cachée contraigne le réseau à 'factoriser' les opérateurs, ou le force à emprunter des chemins permettant de parvenir à la solution mais qui ne correspondent plus au raisonnement que l'on voulait lui apprendre.

Par conséquent, l'augmentation du nombre de neurones en couche cachée peut éventuellement permettre d'obtenir de meilleures justifications en ne contraignant pas le RNA à 'factoriser' son raisonnement.

4.3- Simuler pour prédire ?

À la suite de cette constatation diverses phases d'apprentissage ont été relancées afin de tenter d'orienter davantage le modèle vers la logique qui semblait conduire le contentieux. La base d'apprentissage a été poussée jusqu'à 1024 exercices sur les 16384 que la structure de ce contentieux permet de réaliser, et la structure du réseau de neurones a également été modifiée afin d'accueillir davantage de neurones en couche cachée.

Les résultats fournis par l'algorithme de justification ont permis d'améliorer la justesse des justifications sur tous les exercices sauf sur ceux qui impliquent le critère à l'importance démesurée.

On peut toujours expliquer cette constatation par un défaut ou une imprécision de l'algorithme de justification.

Cependant, cette constatation doit être mise en relation avec le revirement de jurisprudence qui a été constaté quelques mois après la modélisation de ce contentieux. Le 10 juillet 2002 la Cour de Cassation en France a fait de ce critère problématique un critère fondamental du contentieux.

On ne peut pas en déduire pour autant que le réseau de neurone a 'sagement' devancé la jurisprudence de la Cour de Cassation. Par contre on peut supposer que l'importance de ce critère était présente dans la base d'exercice soumise au réseau de neurones, d'une façon 'dispersée', non explicite, et qu'elle a conditionné la façon dont le modèle a appris le contentieux.

L'information latente dans la base d'apprentissage s'est répercutée dans la structure du réseau. Mais dans ce cas, une méthode de justification est nécessaire pour révéler cette information.

Si l'importance grandissante d'un critère s'étale sur 300 cas de jurisprudence, un individu seul aura du mal à détecter cette importance. Par contre, un réseau de neurones ne pourra pas, mathématiquement, passer à côté.

Ceci ne permet pas de conclure sur la raison de la surévaluation d'un critère, mais, au moins, de s'interroger sur l'utilisation de réseaux de neurones en tant que modèles simulant une «tendance» jurisprudentielle. Rappelons que la fonction prédictive des systèmes dynamiques avait été repérée dans un travail précédent (Bourcier & Clergue, 1999). Dans ces cas, il s'agissait aussi d'anticiper un revirement de jurisprudence en matière de caution sur 20 ans de jurisprudence.

5.- Perspectives

5.1- La simulation en univers flou

L'algorithme de justification a été appliqué sur ce type de modèle, sur le même contentieux. Les résultats ont montré une parfaite conformité avec la justification proposée par un système-expert équivalent. Dans ce cas, la justification connexionniste nous permet d'élaborer un arbre justificateur de même nature que celui qui a été obtenu par un système-expert.

Cette constatation n'est pas surprenante dans le sens où l'arbre neural se rapproche de la structuration en arbre décisionnel, mais présente l'avantage de pouvoir intégrer des nœuds décisionnels flous. Ces nœuds ne sont pas justifiables autrement que par la citation des critères qui ont le plus influencé la solution en sortie de ce nœud flou.

5.2- L' auto-compréhension du décideur

Du point de vue de la recherche, une méthode permettant de quantifier l'influence de chaque élément d'information dans le processus décisionnel d'un décideur (car il s'agit bien de justifier par la pondération de chaque élément) peut nous permettre par 'feed-back' de mieux comprendre le mode d'application d'un corpus juridique, d'analyser le processus décisionnel, et d'indiquer l'importance relative des critères qui ont servi de base au raisonnement.

Cette importance peut être cachée aux yeux du décideur. Celui-ci peut ne pas avoir conscience de l'importance ou du peu d'intérêt qu'il accorde à un critère, et éventuellement, s'il en avait conscience, critiquer l'importance qu'il accorde lui-même à tel critère.

Cette application de l'informatique juridique permet de révéler cette importance et de permettre au décideur de réaliser une autocritique. Il peut effectuer un travail plus précis sur son propre raisonnement car il dispose désormais d'un outil pour le faire.

a) Justification de l'intime conviction

Le même algorithme de justification a été appliqué à un réseau de neurones chargé de modéliser une étape d'intime conviction d'un

magistrat dans un autre domaine délicat : la réparation du préjudice esthétique.

Cette étape étant floue, le magistrat n'avait pas réellement conscience de l'importance respective des critères pertinents.

L'algorithme de justification a permis de proposer une explication de la façon dont jugeait le magistrat, et a *mis en lumière les critères qui avaient le plus compté dans sa prise de décision* (notamment une différence de traitement suivant que la victime était un homme ou une femme).

b) Difficile interprétation des mesures

Néanmoins, on doit se poser la question de la justesse des mesures obtenues.

Le problème est qu'on ne dispose pas de moyens permettant de vérifier cette justesse.

L'expérience de justification du contentieux de l'applicabilité des clauses de non-concurrence permet de vérifier l'adéquation de cette mesure en les confrontant avec des justifications-témoins. Mais lorsqu'elle indique que tel critère a une valeur de 135.4 et une influence globale de 23.73% sur la décision finale, dispose-t-on d'un moyen de prouver que cette influence n'est pas de 23.5% ou de 24.2% ? Et face à cette inconnue, peut-on toujours étudier le raisonnement du juge à partir du modèle réalisé ?

Le scénario proposé précédemment, suivant lequel le réseau de neurones a pu emprunter un chemin parmi d'autres permettant de parvenir aux mêmes solutions que le processus décisionnel humain modélisé, est à la source de cette interrogation. Les entrées seraient les mêmes, la sortie également, mais le raisonnement pourrait être tout à fait différent. Auquel cas, la justification proposée par le réseau de neurones ne serait pas applicable en retour au processus décisionnel original.

Effectivement, rien n'indique que le réseau de neurones a utilisé le même raisonnement. Cependant, l'étonnante concordance de sa justification avec l'idée que l'on se fait à l'origine de l'importance relative des critères (que ce soit au cours d'un processus flou ou d'un processus tout à fait maîtrisé), ainsi que la stabilité de sa justification malgré le fait que le réseau de neurones ait été entraîné plusieurs fois avec la même base d'exercices, laisse penser

que cette méthode reste pertinente et de toute façon intéressante pour l'étude détaillée d'un processus décisionnel.

6.- Conclusion ☐ Une éthique de la simulation ☐

En 1998 à Rochebrune, une confrontation entre Frankenstein et Faust avait été proposée pour mettre en lumière une alternative éthique face à la simulation (Bourcier, 1997). Autrement dit ☐ pouvons-nous-- en tant que chercheur-- assumer que la simulation serve seulement à satisfaire notre soif faustienne de connaître ou est-on limité par notre responsabilité face à la réalisation d'un objet-machine qui pourrait agir de façon plus ou moins autonome dans un monde réel (Frankenstein). Il s'est élevé de nombreuses voix pour considérer par exemple que le droit ne pouvait être informatisé (WEIZENBAUM) pour des raisons éthiques. La loi elle-même a interdit l'informatisation de la décision quand celles ci "traite" des données psychologiques ou cognitives liées à la vie privée.

Mais la question éthique était sans doute prématurée par rapport à la technique ☐ le droit voire le sentiment de justice ne pouvaient être correctement simulés dans une machine.

Aujourd'hui, quatre années après, l'utilisation des modèles connexionnistes nous permettent peut-être de lever ce doute. Peut-on éthiquement se priver de créer des objets de simulation qui nous renseignent sur nos comportements cachés ☐ ou simplement sur nos choix implicites? Cette interrogation ne prend-elle pas un sens particulier quand il s'agit de remettre en cause l'exercice des principes fondateurs de nos sociétés ☐ la justice, l'équité, l'égalité devant la loi.

Dans cette recherche, on a pu confirmer que les réseaux de neurones artificiels pouvaient être un modèle adéquat pour modéliser la connaissance juridique floue et qu'ils pouvaient compléter les systèmes à base de règles lors de l'exercice du pouvoir discrétionnaire du juge. Nous avons en outre pu lever un des obstacles majeurs à la mise en oeuvre de réseaux connexionnistes en droit ☐ à savoir leur opacité en présentant un outil de justification. Enfin, une autre vertu pourrait être attribuée au «juge connexionniste ☐: sa possibilité de mettre en lumière des tendances dans l'évolution de la jurisprudence. Pour ces raisons, le modèle neuronal peut être utilisé comme outil de simulation des comportements cognitifs du juge et comme heuristique pour tester les justifications fondées sur des règles, ou mieux, sur le sentiment de justice.

7.- Bibliographie

Bench-Capon Trevor. Neural Networks and open texture. In *Proceedings of the Fourth International Conference on Artificial intelligence and Law*. Oxford, June 15-18, 1993. New York: ACM Press 1993, pp. 292-297.

Bochereau, Laurent, Bourcier Danièle, and Bourguine Paul, 1991. Extracting legal knowledge by means of a multilayer neural networks: application to municipal jurisprudence. In *Proceedings of the Third International Conference on Artificial intelligence and Law*. Oxford, June 25-28, 1991. New York: ACM Press 1991, pp.288-296.

Bourcier Danièle, Représenter quelques règles de droit dans une machine. Au-delà de Faust et de Frankenstein in *Actes des Journées de Rochebrune*, 1998 pp. 61-76.

Bourcier Danièle, Clergue, Gérard From a rule-based conception to dynamic patterns. Analysing the self organisation of legal systems. In *Artificial Intelligence and Law 7*:211-225, 1999.

Fernhout F., Using parallel distributed processing model as part of the legal expert system in *Proceedings of the Third International Conference Logica, Informatica, Diritto*, Firenze, 1989.

Warner, David R. 1993. A neural network-based law machine: the problem of legitimacy, *Law, Computers and Artificial Intelligence 2*, 135.

Le Laboratoire de Brillouin

Théorie de l'information pour l'étude des simulations informatiques

Roger F. Cozien

Gendarmerie Nationale

&

Centre de Recherche des Écoles Militaires de Saint Cyr Coëtquidan

E-mail : `roger_cozien@yahoo.fr`

Est machine, dans le sens le plus étendu, toute idée sans penseur. Alain

1 Introduction

Le physicien Léon Brillouin dans «La science et la théorie de l'information» [6] est certainement le premier à avoir posé les bases formelles des liens pouvant exister entre différents domaines scientifiques. Il établit ces passerelles grâce à une autre théorie, celle de Shannon, ou «théorie de l'information». Ainsi, ce qui n'était au départ qu'une théorie physique de la communication, se voit dotée d'un nouveau statut qui en fait un formidable outil de généralisation. En effet, c'est en particulier grâce aux travaux de Brillouin qu'a été mis en évidence des liens entre la théorie de Shannon et les sciences physiques, autres que d'élégantes analogies. Ainsi, l'approche de Brillouin nous permet aujourd'hui d'appréhender la théorie de l'information comme la réelle généralisation de la thermodynamique statistique «*physique*». Lorsque l'on réalise une telle généralisation cela permet principalement d'exporter la théorie vers d'autres disciplines scientifiques, comme le fait Atlan vers les sciences du vivant [2]. Par contre, on perd nécessairement en précision déterministe. Autrement dit, la théorie devient plus le moyen de fixer, *à priori*, des limites générales de validité des résultats.

Nous allons donc exporter cette approche au domaine de la simulation informatique, et c'est pour cette raison que nous allons mobiliser les perspectives de Brillouin, et en particulier son concept de «*laboratoire*». En effet, ce laboratoire est constitué d'un trio indiscociable, réunissant un observateur (en général humain, mais pouvant être de n'importe quelle nature), un objet d'étude, et d'un instrument de mesure, réel système physique. Les relations existant entre les acteurs de ce trio sont incontestablement thermodynamiques, mais au sens étendu de la théorie de l'information. C'est dans ce cadre précis, mais général pour l'instant, que nous allons inscrire la simulation informatique comme nouvel instrument de mesure. De fait, la simulation n'est pas, de

ce point de vue, un domaine ou une théorie scientifique, elle est une partie intégrante d'une théorie de portée générale, celle de Shannon. De plus, en tant qu'élément constitutif du laboratoire de Brillouin elle est promue au rang de système physique, avantages et inconvénients inclus. Dans ma thèse de doctorat [11], j'ai spécifiquement étudié de quelle nature pourrait être, dans le contexte logique, les liens thermodynamiques entre les éléments du *laboratoire*. Dans cet article nous allons préciser le rôle des simulations en qualité d'**instrument de mesure**, mais également les précautions qu'il faut impérativement respecter pour ne pas subir la tyrannie de la thermodynamique.

2 Le laboratoire de Brillouin

Les principaux concepts attachés à la théorie de l'information présentent un haut degré d'universalité. C'est en particulier le fait d'associer à un événement sa probabilité de survenue et d'en déduire une quantité d'information. Ceci permet donc d'exporter la théorie, y compris vers l'informatique. Ceci est renforcé par l'approche de Brillouin lorsqu'il introduit son concept de **laboratoire**. Cette idée est fondamentalement simple dans sa description, mais extraordinairement riche dans ses développements et dans ses conséquences. Initialement, Brillouin a renforcé une idée fondamentale de la théorie de Shannon et qui concerne l'entropie. En effet, contrairement à la thermodynamique statistique classique, où l'entropie mesure un degré de dégradation d'une forme d'énergie en une autre, Shannon, puis Brillouin, lui associe le degré de connaissance, ou plus exactement d'ignorance, que possède un observateur relativement à un système physique donné. C'est là le point essentiel dans une compréhension moderne, et presque opératoire, de l'entropie.

Le lien retour vers l'entropie physique *classique* est nécessairement fait par la notion centrale d'*énergie*. En particulier, par la quantité d'énergie, quelle que soit sa forme, que l'observateur devra dépenser, on dit exactement «dégrader», pour réduire son ignorance sur l'objet étudié. C'est cette dégradation d'énergie qui va rétablir le bilan entropique, en provoquant *de facto* l'augmentation de l'entropie de l'environnement [11][6][2][17]. Il est donc explicitement posé l'équivalence entre ignorance, entropie et dégradation d'énergie. Brillouin, a initialement cherché à exorciser le «*démon de Maxwell*». Il y est parvenu par l'apport de la théorie de l'information, et a souligné le rôle central de l'observateur, et de sa volonté permanente de réduire son ignorance. Le démon dont il est question est une pure expérience «par la pensée» (*gedankenexperiment* aurait dit Mach) imaginée par le physicien écossais James Clerk Maxwell pour violer le second principe dans son *Theory of heat - chapitre XXII Limitation of the second law*. Initialement Maxwell voulait attirer l'attention sur un aspect particulier de la théorie moléculaire. À cette époque, le principe de Carnot, ou encore second principe, était un des faits les mieux établis de la thermodynamique. Il énonçait qu'on ne pouvait réaliser une différence de température dans un système clos et isolé sans dépenser du travail.

De façon particulièrement novatrice et inattendue, Maxwell postula qu'il existait un lien entre la validité de ce principe et nos capacités limitées d'observation et de manipulation de la réalité physique : «la seconde loi de la thermodynamique est abso-

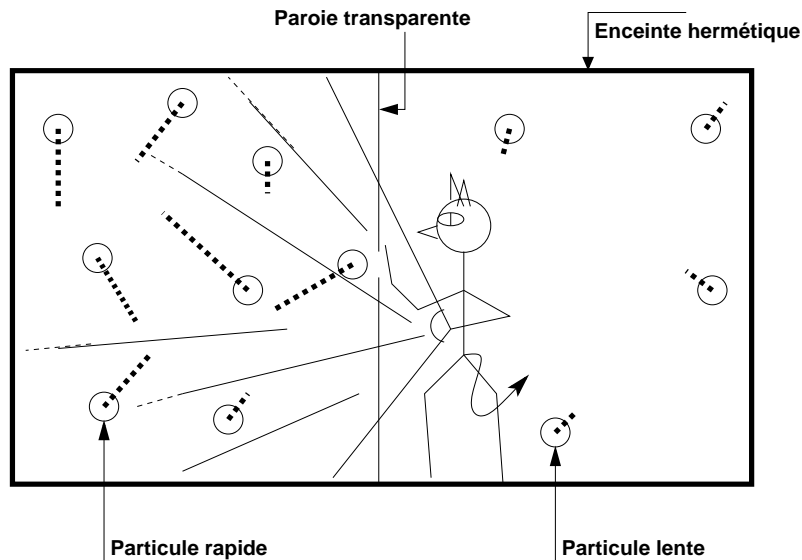


FIG. 1 – Démon de Maxwell

lument vraie, tant que nous ne pouvons agir que sur les corps pris en masse, et que nous n'avons pas la faculté de percevoir ou la possibilité de manier les molécules séparées dont ils sont constitués.» Pour illustrer son intuition, il propose donc une expérience mettant en scène un être doué de facultés extraordinaires car capable de discerner les molécules dans leur course. Plaçons cet être, ou démon, dans une enceinte close et parfaitement isolée tel que cela est représenté sur la figure 1. Dans cette enceinte se trouve des molécules d'air se déplaçant à des vitesses et en suivant des directions différentes et distribuées aléatoirement. Maxwell imagine que la paroi étanche est percée d'un seul trou de la taille d'une molécule. Le démon a la possibilité (d'une façon ou d'un autre) de laisser passer les molécules lentes à droite de l'enceinte, et de boucher le trou pour que les molécules rapides restent à gauche. Ainsi, au fur et à mesure du temps, va se créer une différence de température entre les deux côtés de l'enceinte. Et, grâce à cette différence il est possible de créer du travail sans qu'en théorie, le démon n'ait par ailleurs dégradé de l'énergie (ou de façon négligeable) pour réaliser le tri entre molécules.

De nombreuses approches ont été proposées pour exorciser ce démon, que la pensée scientifique de la fin du 19^{ième} siècle ne pouvait admettre. Plus parce que l'on ne pouvait envisager la réalisation d'un dispositif aussi sensible et précis que le démon, que par cohérence scientifique. Dans le contexte qui est ici le notre, retenons l'approche de Brillouin et celle de Landauer [16]. En simplifiant, Brillouin fit remarquer qu'aussi sensible soit le démon, il doit capter un minimum d'information sur la position et la vitesse (deux positions successives) de la molécule. Pour ce faire, le démon doit dépenser de l'énergie de façon non négligeable, par exemple en «éclairant» la scène. Cette apport d'énergie (ici la lumière) va nécessairement produire une augmentation de l'entropie de toute l'enceinte sous forme de chaleur, et donc gommer l'avantage induit par l'écart de vitesse moyenne entre les molécules des deux côtés de la paroi. Bien plus tard, Landauer, en se rapprochant des ordinateurs doués de mémoires à montré que l'observation faite par le démon est équivalente à l'effacement d'une mémoire,

ce qui n'est rien d'autre que la dissipation irréversible d'information.

Brillouin, en exorcisant le démon a montré que tout observateur doit nécessairement, pour réduire son ignorance, dégrader une quantité minimale d'énergie. Ce processus, par essence thermodynamique, s'appelle une «*mesure*». Pour ce faire, l'observateur a nécessairement besoin d'un instrument de mesure. Cet instrument va être le siège, voire l'origine, de flux thermodynamiques particuliers. C'est donc le triptyque : [*Observateur* ↔ *instrument de mesure* ↔ *objet*] qui va être au centre de nos préoccupations. Lorsqu'on le baigne dans un environnement fini, nous obtenons l'exacte définition du laboratoire de Brillouin.

Retenons d'ores et déjà, que la seule façon pour un observateur quelconque, mais baigné dans un environnement physique, de réduire son ignorance sur un objet quelconque de cet environnement est de procéder à une *mesure*. Cette mesure n'est d'une part possible que grâce à un système physique particulier : l'*instrument de mesure*. D'autre part, elle va induire des flux thermodynamiques domestiques aux éléments du triptyque de Brillouin. Dans le cas qui nous intéresse, quel statut pouvons nous donner à une simulation informatique ? En général, nous utilisons cet outil lorsqu'un formalisme mathématique nous échappe, voire quand nous ignorons même s'il existe. Si nous poussons plus loin cette analyse, on se rend compte, que dans de nombreux domaines, ne possédant pas de théorie, telle la biologie, on se sait dire si l'on a spécifié explicitement et exhaustivement le problème que l'on souhaite résoudre. La simulation a cela de particulier qu'elle seule autorise une approche qui peut être exclusivement qualitative, et sur des informations préalables incomplètes, voire partiellement fausses [10][9]. Ceci, pour une raison essentielle : contrairement à la démarche du calcul informatique classique, où une méthode purement algorithmique est implémentée, elle-même représentation d'une méthode formelle arithmétique ou algébrique (voire géométrique), la simulation informatique implique très fortement l'observateur humain. Ce dernier validant, voire ré-orientant, durant la simulation, son exécution. Il y a donc un retour quasi permanent vers le concepteur de la simulation, et dans des délais nettement plus courts que dans le cas d'une exécution informatique.

La première réponse que nous pouvons donner à la question du statut de la simulation informatique, est donc bel et bien celui d'un *instrument de mesure*, au sens de Brillouin. Ce qui signifie premièrement, que la simulation nous sert à réaliser une *mesure* sur un objet dont nous sommes en partie ignorant, et deuxièmement, que la simulation devient un réel système physique, et de fait subit les lois de la thermodynamique, fussent-elle adaptées au domaine logique. Le triptyque de Brillouin est ainsi formé, et il suffit de l'immerger dans un environnement physique fini, pour que soit délimité notre laboratoire.

2.1 Théorie de l'information et informatique théorique

Nous l'avons dit : la théorie de l'information propose une généralisation de certains concepts de la physique statistique. Comme le souligne Atlan, nous ne parlons de théorie que parce que nous supposons que l'information est mesurable. Pour donner une nature mathématique universelle à l'*information*, Shannon l'a relié à la probabilité de survenue d'un événement particulier, parmi une collection d'événements. On voit à ce stade, que l'information n'est cependant pas un concept purement mathématique. En effet, cette façon de définir l'information suppose que l'observateur a une connaissance préalable sur les événements possibles, (ce que Shannon appelle l'«alphabet»), et sur leurs probabilités de survenue. Autant de connaissances

contextuelles, qui échappent totalement au formalisme de la théorie. La théorie de l'information n'existe qu'à travers le couple **événement**↔**observateur**. L'observateur reçoit donc, ou plutôt, *recupère* une certaine quantité d'information, suite à une observation/mesure. Lorsqu'il s'agit de systèmes composés d'un grand nombre d'éléments en interaction, cette quantité est susceptible de renseigner l'observateur sur l'état du système. C'est ce cas, en particulier pour la théorie de l'information, qui fait le lien avec la physique statistique.

Ce qui donne son caractère universel à cette théorie, c'est que d'une part, il s'agit de probabilités, et que d'autre part, elle utilise le concept d'*événement*. Car il se trouve que dans de nombreux domaines scientifiques, de nombreux phénomènes se comportent comme des événements. Par exemple, en biologie, Atlan, assimile les séquences d'ADN à des messages, dans lesquels l'apparition de chaque base est un événement. On se rend compte, que la physique statistique, et en particulier le concept d'entropie statistique, n'est qu'un cas particulier et restreint, de l'utilisation de la théorie de l'information. Cette théorie utilise donc des «événements», mais, elle le fait de façon neutre. Ainsi, chaque domaine scientifique est relativement libre de l'enrichir, selon ses propres grandeurs. Dans ma thèse j'ai répondu à la question des apports possibles de la théorie de l'information dans l'étude des phénomènes induits par l'exécution des codes distribués. Dans cet article, nous nous posons plus spécifiquement la question du statut thermodynamique des simulations informatiques. Si l'informatique ne traite pas de *l'information* au sens de Shannon, de prime abord, nous pouvons quand même affirmer l'existence du couple **événement**↔**observateur**. En effet, dans l'exécution de n'importe quel programme un tant soit peu «interactif», les sorties dans le temps du programme, sont autant d'événements auquel l'observateur va réagir. De ce point de vue, il y a bien une communication entre les deux parties. Nous pouvons étendre ce raisonnement dans le cas où nous nous intéressons uniquement aux couplages logiques existants entre programmes ou parties actives de programmes distribués. Ainsi, lorsqu'une de ces parties est dans un état particulier, et que cet état peut être *connu* d'une autre, potentiellement, un couplage «de Shannon» peut se faire. Donc, les programmes deviennent tour à tour émetteurs ou récepteurs d'information, au sens de Shannon.

Ainsi, les sorties de toute exécution d'un programme quelconque sont autant de symboles parmi un alphabet de taille variable. À la survenue de chaque symbole nous pouvons lui associer sa probabilité de survenue au sein de cet alphabet. Ceci est purement théorique. En effet, ormis les cas extrêmement triviaux, nous ne disposons pas de l'alphabet de référence, et encore moins des probabilités associées aux symboles. Pourtant, cela ne remet pas en cause cette approche tant il est vrai que l'approche thermodynamique, en particulier celle de Shannon, est là pour fixer *à priori* de grandes lignes directrices. De plus, il y a dans cette théorie une certaine liberté d'échelle : nous pouvons nous restreindre localement à un sous groupe de symboles événements. N'oublions pas que tous ces aspects sont éminemment relatifs à l'observateur lui-même, puisque c'est lui qui attribue les probabilités aux événements générés par l'exécution du programme, ici, d'une simulation. Outre le fait que cela renforce, une fois de plus, le rôle de l'observateur, cela autorise à raisonner en termes purement qualitatifs, et à ne distinguer que de grands sous-ensembles de probabilités : *grandes probabilités* de survenue, *moyennes, faibles, ...*

Retenons ici, que la théorie de l'information est dans sa première acception, parfaitement transposable au domaine de l'informatique, en ce qu'exécuter un programme, ce n'est rien d'autre que générer des événements, chacun porteur d'une certaine quantité d'information.

Cette quantité peut être extrêmement faible pour des instructions du type `i++`, et potentiellement très grande pour des simulations basées sur une forte distribution logique [11]. Mais, la théorie de l'information est également exportable dans notre domaine, y compris dans sa seconde lecture, celle qui place en avant l'observateur, son ignorance, sa volonté de la réduire, et l'énergie qu'il devra dégrader pour y parvenir. Exécuter une simulation informatique c'est non seulement produire des événements, et de fait, engendrer des flux thermodynamiques vers l'observateur, ainsi que vers l'objet étudié, l'environnement et l'ensemble du laboratoire.

2.2 Informatique, information et mesure

Dans ses études Brillouin souligne la différence qu'il y a entre deux types d'information, et à partir de cette distinction, introduit une nouvelle notion. Dans la théorie de Shannon il est fait mention de la différence entre *information libre* et *information liée*. On peut simplement expliciter la distinction entre ces deux notions en disant que l'information libre renvoie à des événements purement abstraits, détachés de toute réalité physique, et faisant partie d'un alphabet plus vaste, lui-même abstrait. C'est typiquement le cas lorsque l'on réalise des tirages de boules rouges et noires mélangées dans une urne, et que l'apparition d'une boule rouge ou noire, ne renvoie à aucun élément autre que le fait qu'il y a des boules rouges et noires dans une urne ! À l'opposé, l'information liée renvoie nécessairement à un système physique. Plus exactement, l'événement observé doit correspondre à un micro-état du système physique considéré. Ce point, initialement purement contingent aux sciences physiques, l'est également pour l'informatique. En effet, on suppose, sans grand risque, que l'état macroscopique d'un système peut être le résultat d'un grand nombre de micro-états. Il s'agit là du fondement de l'approche de la physique statistique de Boltzman [12]. En effet, il y a rarement, pour ne pas dire jamais, bijectivité entre l'état macroscopique et un seul micro-état. Nous sommes parfaitement dans ce cas lorsque nous exécutons un programme : nombre d'objets informatiques potentiellement élevé, et surtout, nombre d'états accessibles à ces objets également très grand. Sans descendre à un trop faible niveau de granularité (celui des registres, variables, instructions élémentaires, ...), dans le cas des simulations mettant en œuvre de nombreuses entités, nous ne pouvons garantir la bijectivité entre l'observation macroscopique de la simulation, et les interactions entre ces entités ainsi que leurs états individuels.

L'information liée, c'est ce que Brillouin appelle la *néguentropie*. Il l'oppose donc, au sens arithmétique, à l'entropie de Shannon. La néguentropie est donc la diminution de l'ignorance de l'observateur. La néguentropie ne peut, dans le contexte de l'approche de Brillouin, être obtenue que consécutivement à une mesure. Cette approche est cependant suffisamment générale pour couvrir l'ensemble des cas similaires : les cas où un expérimentateur réalise une mesure via un instrument, lui-même étant considéré comme un réel système physique¹. Le second principe impose que toute l'énergie dégradée dans le processus de mesure ne puisse servir à l'acquisition de néguentropie. Une partie est nécessairement dissipée et participe directement à l'augmentation de l'entropie du laboratoire. Dans le contexte thermodynamique nous disons que l'information a un coût, et que la seule façon de le payer c'est en dégradant de l'énergie [6][7][11]. Dans le cadre de la théorie de l'information, c'est ce que Brillouin appelle

¹Un *système physique* est au sens de Brillouin, mais également pour la majorité des physiciens, un objet physique dont l'état macroscopique (l'état à l'échelle de l'observateur) est l'expression d'une combinaison d'états microscopiques

le principe de Carnot généralisé, et qui se formalise de la façon suivante :

$$\Delta(S - I_N) \gg \gg 0 \quad (1)$$

où S représente l'entropie produite par le processus de mesure et I_N l'information liée, ou néguentropie, obtenue par l'observateur. Ainsi, Brillouin a démontré que toute l'information/néguentropie que pourra gagner un observateur, suite à une mesure, sera de plusieurs ordres de grandeur inférieurs à l'augmentation de l'entropie provoquée par cette même mesure. Réduire son ignorance à donc un coût thermodynamique non négligeable.

En énonçant son principe de «néguentropie de l'information», Brillouin a explicité, du point de vue la théorie de l'information, la relation existant entre le système observé, et l'instrument d'observation. Ce faisant, il a non seulement donné une dimension formelle à la *mesure*, mais surtout il va la transformer en phénomène physique. La relation de Carnot généralisée a comme remarquable généralisation que l'information, quelle que soit sa forme, «ne peut être obtenue qu'en empruntant de la néguentropie à un système physique» [6]. Notons que le «système physique» dont il est ici question est en fait l'instrument de mesure. Si nous revenons à la mesure en tant que phénomène physique, les développements de Brillouin amènent à la conclusion que la mesure est un phénomène irréversible. L'auteur dit cependant, qu'il faut un couplage minimal entre le système étudié et l'appareil de mesure, pour que cette irréversibilité soit réelle.

De façon générale, on peut penser que nous ne nous sommes pas assez posés la question de la mesure en informatique. Certainement parce que nous l'avons plus considérée comme un objet mathématique, que comme un «phénomène», tel que Bohr le concevait. Dans des paradigmes de programmation décentralisés ou distribués, le problème de la mesure est délicat. Comme potentiellement le nombre d'objets peut être grand, voire très grand, il est impossible d'envisager toutes les interactions, ni même toutes les actions locales. Ainsi, nous nous trouvons dans la même situation que l'observateur macroscopique d'un système physique classique. Quand nous disons qu'il est impossible d'envisager toutes les actions ou interactions c'est, d'un certain point de vue, faux. En effet, rien n'empêche d'exécuter un code, aussi distribué soit-il, et de tracer les répercussions de chacune des actions des objets. On conçoit aisément, que la consommation de ressources et surtout de temps serait, dans une telle entreprise, énorme et démesurée, relativement à l'exécution normale du code distribué initial. Nous ne sommes dès lors pas très éloigné du chemin parcouru par Boltzmann lorsqu'il posa les premiers principes de la physique statistique. C'est ce que l'on appelle le «hasard par incapacité» : celle de ne pas pouvoir se placer à l'échelle microscopique à chaque instant de la mesure [18].

3 Thermodynamique logique

S'il n'est pas possible ici de dessiner le cadre exhaustif de la thermodynamique logique [3] [4][16][21] [19][11], nous pouvons cependant synthétiser les éléments des sections précédentes et en tirer les principes qui nous intéressent ici. Ainsi, on notera **SEL**, le «support d'exécution logique», et **SEM**, le «support d'exécution matériel». Si α est le programme qui nous intéresse, en l'occurrence une simulation informatique, et $\vec{\alpha}$ son exécution, alors le **SEL** désigne toutes les couches logicielles nécessaires à $\vec{\alpha}$. Il s'agit de l'OS, mais également d'une machine virtuelle dans le cas des langages interprétés. De la même façon, le **SEM** désigne la partie matérielle, soit simplement dit la *machine*. Ainsi, dans le laboratoire de Brillouin, α sera un véritable

instrument de mesure. Et $\vec{\alpha}$ est l'action de mesure. Mais que mesurons nous réellement ? Cette question triviale, n'appelle pas de réponse triviale. En particulier lorsqu'il faut introduire une unité, car aucune mesure ne peut s'exprimer sans référence à une unité. De la même façon, sur quel objet s'exerce la mesure ?

De fait, nous réalisons une simulation parce que nous ne disposons pas d'une «fonction générale» F de résolution, dont on pourrait en extraire une méthode algorithmique et donc, implémentable. Pire, dans certain cas, nous ne savons même pas dire, si le problème a été exhaustivement posé. Résoudre une équation du second degré ne présente pas le même niveau d'abstraction de F que de simuler l'activité magnétique du soleil, ou la construction d'une fourmière, des robots autonomes [8], ou encore des conflits entre pays [9]. Exécuter un programme de résolution, telle la recherche de racines d'une équation, fait appel à une méthode systématique dans l'exploration de l'espace des solutions. Mais, c'est également réaliser une mesure. Exécuter une simulation permet également d'explorer une portion de l'espace des solutions, ou espace des possibilités, selon le type d'objet étudié, mais de façon fort moins systématique et séquentielle. L'expertise et l'implication de l'observateur *manipulateur* est beaucoup plus grande. La connaissance préalable et contextuelle, l'intuition, sont autant de facteurs qualitatifs qui permettent d'orienter une simulation. Contrairement à l'exécution d'un calcul classique, où l'on va boire un café, manger ou dormir, une simulation s'observe, s'évalue, se commente. La place de l'observateur est centrale. En effet, par rapport au nombre, extraordinairement grands de chemins possibles dans l'exploration de l'espace d'évolution, comme nous ne possédons aucune méthode algorithmique, c'est l'observateur qui doit faire certains choix et orienter la simulation. Dès lors $\vec{\alpha}$ n'est qu'un instrument, le moyen d'ouvrir une fenêtre sur l'espace d'évolution de l'objet étudié.

Il se crée un échange de néguentropie/information entre l'observateur et l'instrument de mesure, soit l'exécution de la simulation $\vec{\alpha}$. Nécessairement, et dans les proportions du principe de Carnot généralisé, des flux d'entropie vont se mettre en place, ayant comme première source $\vec{\alpha}$. Par cascade, cette entropie se transmet au SEL et au SEM pour enfin se répandre dans le laboratoire. Brillouin arrive à la conclusion que toute observation d'un phénomène (à l'exception des phénomènes parfaitement adiabatiques) doit s'accompagner d'une augmentation de l'entropie du dispositif de mesure et du «laboratoire» dans lequel est réalisée l'observation, dans les proportions de la relation de Carnot généralisé. Par conséquent, une observation, et plus généralement une mesure, est un processus irréversible. Les schémas de la figure 2 détaillent le processus de *mesure*. Le premier schéma indique qu'il faut en premier lieu un couplage *transitif* entre l'observateur et son objet d'étude, via l'instrument de mesure. Ce couplage doit être compris dans le cadre de la théorie de l'information. Autrement dit, l'observateur doit être apte à recevoir les événements produits par l'instrument de mesure, et à les «interpréter» comme de l'information liée.

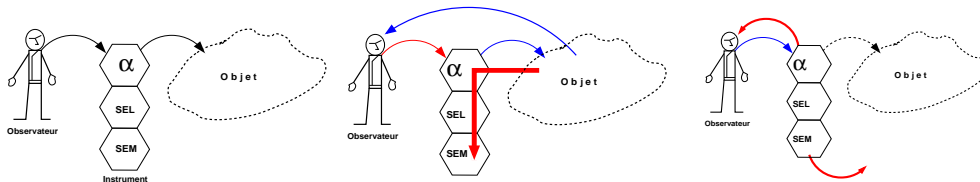


FIG. 2 – Couplages thermodynamiques

La mise en marche de l'instrument de mesure, ou encore l'exécution de la simulation $\vec{\alpha}$ produit un couplage logique entre cet instrument et l'objet étudié. Un ensemble de flux (flèches rouges pour l'entropie, flèches bleues pour la néguentropie) vont se créer, en concordance avec les assertions de Kelvin et Clausius [11]. Ainsi, l'objet étudié va voir son entropie diminuer, proportionnellement à l'énergie et/ou au temps utilisé. En fait c'est le couple (transitif) *observateur* ↔ *objet* qui va voir son entropie diminuer. Simplement parce que l'ignorance de l'observateur sur l'objet va diminuer. Dans le même temps, l'entropie de l'instrument de mesure va considérablement augmenter. Cette augmentation ne peut être que supérieure à la décroissance de l'entropie de l'objet, en accord avec le principe de néguentropie de Brillouin. Au delà de ce principe, l'explication réside simplement dans le fait que toute l'énergie électrique nécessaire au fonctionnement du dispositif de mesure, ne peut pas entièrement être utilisée pour l'opération de mesure.

Le troisième schéma de la figure 2 illustre les flux lorsque la simulation est terminée et que l'on réinitialise l'ensemble des objets vers un ensemble de valeurs déterminées et considérées comme les valeurs initiales. C'est ce que l'on nomme une phase de compression ou de convergence [11][3][4] [14]. Dans cette phase, l'objet étudié n'est pas concerné par les flux, et, d'un certain point de vue, le couplage entre l'instrument et l'objet s'«estompe». En effet, à ce moment précis, aucun flux ne lui est imputable, et cette étape pourrait exister même si ce couplage cessait réellement, le temps de l'effacement. Ainsi, durant cette phase, le dispositif va évacuer l'entropie accumulé dans la phase précédente, en rayonnant de la chaleur dans son environnement. En définitive, il ne faut pas oublier qu'il faut raisonner sur un cycle complet, tel celui du moteur de Szilard [19][16]. Dans la pratique, une mesure va durer de nombreux cycles alternant effacements et mesures, convergences et divergences [14][3][4]. Sur ce dernier schéma, il est porté une flèche rouge, allant de l'instrument de mesure vers l'observateur. Ce qui signifie une augmentation de l'entropie de ce dernier, et plus exactement, un accroissement de l'ignorance de l'observateur envers le dispositif de mesure. Ceci ne peut se comprendre pleinement que dans une perspective *historique*. En effet, à chaque cycle logique, l'observateur perd irréversiblement l'information contenu dans la mémoire du dispositif de mesure. La majorité des auteurs s'accordent à penser que c'est dans cette perte irréversible d'information que se trouve la plus grosse source d'entropie [11]. Au final, sur un cycle complet, le système *observateur + instrument + objet* aura plus d'entropie, sous une forme ou une autre, que l'observateur n'aura gagné d'information. Autrement dit, faire diminuer son ignorance par un processus purement logique, coûtera une quantité d'énergie largement supérieure à celle suffisante à la mesure : c'est le principe de Carnot généralisé.

Pour finir cette section sur une perspective plus générale, voire philosophique, on peut, avec Brillouin, interpréter l'acte de mesure comme la possibilité offerte à l'observateur d'emprunter de la néguentropie à l'instrument de mesure. Ce qui signifie, que l'observateur va troquer de l'ignorance sur l'objet étudié contre de l'ignorance sur l'état de l'instrument de mesure [6]. Dans le cas d'une simulation informatique, la première manifestation de ce principe, est que si l'observation de $\vec{\alpha}$ nous a apporté de l'information sur l'objet étudié, notre ignorance sur l'état de $\vec{\alpha}$, et en particulier son histoire, croît exponentiellement avec le temps d'exécution de la simulation [11]. Enfin, Szilard fait remarquer que si l'observateur interprète la mesure comme un apport d'information liée, et donc réduit localement l'entropie du laboratoire, c'est parce qu'il est intelligent² [19]. Si l'observateur n'était pas intelligent, la réduction locale d'entropie

²Ce qui nous donne une définition originale et riche en développements de l'«intelligence».

serait quasi-nulle. Ceci confère à l'information liée, ou néguentropie, un statut privilégié [11].

4 Choix d'un schème de programmation : des objets aux objets actifs

Lorsque nous parlons de simulation, on sous-entend bien souvent l'utilisation d'un simulateur. L'écriture d'un tel logiciel est réalisable avec n'importe quel langage informatique, même s'il existe un schème de programmation qui soit mieux adapté à cette discipline. Il n'existe pas un type unique de simulation, mais, si l'on souhaite simuler le comportement, l'évolution, les interactions, au sein d'une collection d'entités, ayant potentiellement, une granularité, et des contenus sémantiques différents, alors un modèle distribué sera le plus adapté. J'ai donc choisi un langage de programmation orienté objet qui offre un haut niveau d'expressivité, tant dans la phase de conception, que durant celle de codage [5][11][13].

Les modèles distribués ont la particularité d'induire un style de programmation basé sur la déconcentration de la fonction logique du programme de référence. Nous nous intéressons aux simulations informatiques en tant que sujet de notre étude. Il nous faut donc nous doter d'un moyen informatique de produire des simulations de façon *contrôlée*. Ce contrôle signifie en premier lieu, s'assurer l'indépendance entre la simulation et l'outil qui a servi à la générer. Puis, c'est vérifier qu'il y a aussi indépendance entre, $\vec{\alpha}$, l'exécution de la simulation, et le moteur de simulation servant à exécuter α . Autrement dit, il faut s'assurer de la *neutralité* du moteur de simulation. Cette neutralité est de trois ordres : logique, d'exécution, et temporelle. La neutralité logique signifie que lors de l'exécution, toutes les instructions contenues dans α sont réellement exécutées. La neutralité d'exécution signifie que seules les instructions contenues dans α sont exécutées. Enfin, la neutralité temporelle signifie que le temps d'exécution est équitablement réparti entre les entités logiques simulées. Il est important de procéder à cette phase d'étalonnage, car $\vec{\alpha}$ va devenir notre instrument de mesure, au sens du physicien. Il est donc capital de réduire au maximum la part relative du moteur de simulation dans les manifestations de $\vec{\alpha}$, et l'expression des résultats. Et comme cette part relative ne peut être réduite à zéro, il faut vérifier qu'elle est, soit négligeable, soit parfaitement quantifiable. Dans tous mes travaux j'ai choisi d'utiliser *oRis*, langage de programmation où le formalisme objet est explicite [11][20]. À l'intérieur du modèle objet, nous avons retenu le schème de programmation par objets actifs, concept qui est explicitement contenu dans *oRis*.

Rendre actif nos objets doit nous amener à poursuivre l'effort de déconcentration, que l'on appelle, dans le cas des objets actifs, effort de décentralisation. Tout ceci dans un seul but : rendre les objets actifs autonomes. Cette autonomie prend une nouvelle dimension en comparaison de l'autonomie des objets. Un objet actif **A** peut, lorsqu'un autre objet actif **B** fait un appel explicite à l'une de ses méthodes, refuser de rendre le service. Il n'y a en effet plus d'instance dominante. Donc, chaque objet est libre de décider, selon ses spécifications internes, ou son état au moment de l'invocation de méthode, s'il va répondre à une demande de service. Le schéma de la figure 3 schématise le processus d'incrémentalisation des modèles de programmation.

De l'algorithme de référence, nous aboutissons à un code *multi-activités*. Conceptuellement, le principal apport des objets actifs - OA - réside dans *l'autonomie des instances*. Cette autonomie est en fait triple : **autonomie d'exécution**, **autonomie fonctionnelle** et **autonomie de code**.

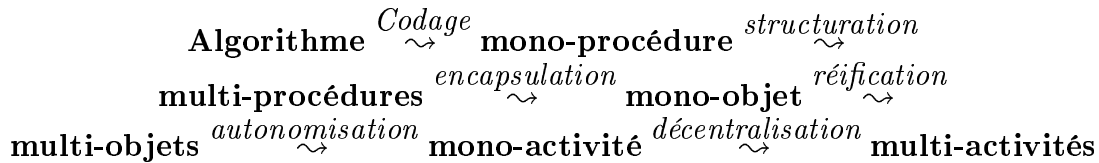


FIG. 3 – Modèles de programmation

Autonomie d'exécution : chaque instance possède son propre flot d'exécution qui est appelé par l'ordonnanceur et exécuté de manière perpétuelle. Toutes les instances ont leur(s) flot(s) exécuté(s) en parallèle. Ainsi, l'exécution d'une méthode d'un objet actif n'est pas liée uniquement à son appel par un message venant d'un autre objet. L'exécution de la méthode se fera en premier lieu, si elle est prévue explicitement dans le code du flot d'exécution.

Autonomie fonctionnelle : chaque objet actif a ce que nous pouvons appeler de façon abusive un *but*³. C'est à dire qu'il a quelque chose à faire, et qu'il le fait. Certes, ceci est relatif au contexte qu'il perçoit via ses capteurs. Dans *oRis*, tout est «public». Les instances ont quand même la possibilité de savoir qui est à l'origine de la demande et donc de refuser d'accéder à la demande. Dans le même ordre d'idée, si l'objet actif est perpétuellement occupé, il est capable de discerner si la demande de service qui lui est faite ne va pas perturber son action en cours. Ainsi, si cette action n'est pas compatible avec la demande il la rejettera.

Autonomie de code : ce concept est à la fois le plus difficile à cerner, et le plus avancé. Le langage *oRis* est un langage interprété dont le code est dynamique. En effet, pendant l'exécution du programme, il est possible, pour un opérateur humain, de créer de nouvelles classes et de nouvelles instances, de surdéfinir une classe, une méthode de classe, une méthode d'instance. Mais également de rajouter des méthodes à une instance. Pour ce qui est des instances, ces aspects dynamiques sont regroupés sous le vocable de *granularité d'instance*. Sous *oRis*, il est donc possible de différencier une instance de sa classe d'origine. Cette objet actif devient alors l'instance d'une classe qui n'a pas été écrite dans le code d'origine. Ceci confère une très grande expressivité au langage, en particulier dans le cadre de simulations où l'on va pouvoir directement *parler aux instances* [20][13]. Enfin, dans le cadre de l'utilisation des objets actifs pour implémenter des simulations il faut impérativement souligner que le modèle objet est fondamentalement un modèle du type *client* ↔ *serveur*. Nous pourrions même dire qu'il est du type *maître* ↔ *esclave*, car dans le modèle standard, une requête est impérative et synchrone. Par contre, l'autonomie fonctionnelle conférée aux objets actifs fait de ce schème, un modèle parfaitement asynchrone. Cette caractéristique offre au programmeur un important accroissement d'expressivité et doit être utilisée dans tous ses raffinements.

5 Moteur de simulation et équité

Dans l'utilisation d'un simulateur implémenté sur une machine séquentielle, l'important réside dans la façon dont le moteur de simulation désigne les instances pour les faire évoluer. Puis, il faut vérifier que le mode de désignation n'introduise pas d'effets de bord qui fausseraient les résultats. Ceci est principalement vrai, lorsque la simulation est une métaphore naturelle : on cherche à simuler un phénomène réel. Il existe dans *oRis* deux modes de désignation : l'un est

³J'utilise le terme *abusif*, car la notion de *but* est trop souvent teintée d'anthropisme. Le but de nos OA est éminemment relatif à un observateur ou programmeur humain.

séquentiel, l'autre aléatoire sans remise. Dans ce mode, les instances sont désignées une à une dans un ordre aléatoire et ne peuvent être désignées qu'une fois par cycle. Au cycle suivant, l'ordre de désignation changera aléatoirement. Le premier mode nous a rapidement semblé trop artificiel, car il introduit une priorité entre les instances. Cette artificialité se traduit immédiatement dans l'aspect visuel de la simulation. C'est pourquoi nous avons systématiquement utilisé le mode aléatoire, qui assure un *brassage* des instances et instaure un principe d'**équité** des instances face au moteur de simulation.

5.1 Simulations et croissance de l'entropie

La simulation que nous allons décrire est la métaphore d'une expérience physique réelle. Il va s'agir de *retrouver*, grâce à une simulation par objets actifs, la loi de croissance de l'entropie dans un gaz parfait, et ceci, du point de vue de la thermodynamique statistique. On suppose le mélange des particules idéal, c'est à dire qu'il n'y a pas interaction entre les particules. Nous savons que l'entropie statistique est de la forme $S = k \ln W$. De plus, la croissance de l'entropie, dans un système isolé, est un processus irréversible tel que $\Delta_t S > 0$. Autrement dit, l'entropie atteint sa valeur maximale lorsqu'un système isolé, laissé à lui-même, atteint son **état le plus probable**. Cet état le plus probable est l'état macroscopique auquel correspond le plus d'états microscopiques ayant la même probabilité de réalisation, également et improprement appelé : *état de plus grand désordre*. Si nous ne faisons aucune hypothèse sur l'état le plus probable, il suffit de réaliser l'expérience, et d'observer vers quel état converge le système. Dans le cas des gaz parfaits, nous savons que cet état est, macroscopiquement, réalisé lorsque les particules, placées dans une enceinte hermétique, occupent idéalement l'espace. C'est à dire lorsque les particules sont distribuées aléatoirement dans l'espace de l'enceinte. Nous allons vérifier ce résultat grâce à une simulation.

Protocole expérimental : Il s'agit de placer dans une enceinte hermétique des instances, métaphores de molécules d'un gaz. Au début de l'expérience ces molécules sont confinées dans un petit volume de l'enceinte, puis elles sont abandonnées avec une vitesse et une direction initiale aléatoire. Dans notre simulation, nous limitons les interactions entre particules aux changements de direction : à chaque collision l'instance prend aléatoirement une autre direction sur $2 \times \pi$, lorsqu'il s'agit d'une collision avec une autre molécule, et sur π vers l'intérieur de l'enceinte, s'il s'agit de la paroi. Les copies d'écran de la figure 4 montrent l'évolution du processus.

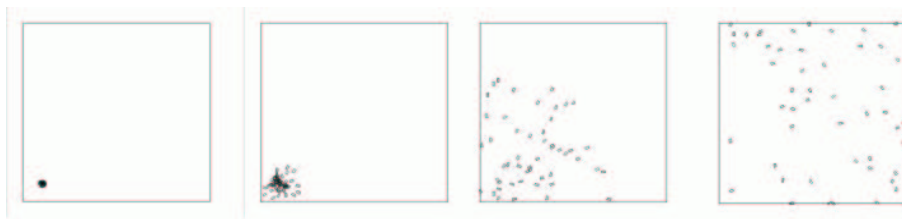


FIG. 4 – Croissance de l'entropie

Au delà de l'impression, il faut quantifier ces résultats et les comparer aux lois physiques. La théorie dit qu'un tel système isolé et ergodique, laissé à lui-même, doit évoluer vers son

état le plus probable, qui correspond à celui d'entropie maximum. Nous pouvons donc calculer une distance théorique idéale entre chaque molécule une fois l'état de plus grande entropie atteint. La vitesse étant constante, et l'orientation de la molécule indéterminable à l'instant t de l'observation, nous pouvons restreindre l'espace des phases à l'espace de l'enceinte sur lequel nous appliquons une métrique euclidienne mesurée par un repère orthonormé. Donc, si a est la longueur de l'enceinte carrée de notre simulation, a^2 est la surface. si N est le nombre d'instances particules, $\frac{a^2}{N}$ est l'aire d'une cellule imaginaire dans laquelle nous devrions trouver une et une seule instance-molécule avec une probabilité très proche de 1. Ceci, dès que le système est très proche de son état d'équilibre, ou l'entropie très loin de sa valeur d'origine. Si l'on suppose que ces cellules sont circulaires, on peut en calculer le rayon ρ , tel que $\rho = \sqrt{\frac{a^2}{N}} = \frac{a}{\sqrt{N}}$. Ce rayon est également la distance moyenne théorique mesurable qui devrait séparer les instances-molécules dès que le système est proche de son état d'équilibre. On prendra $a = 50$ unités, les 200 instances sont placées en un point quelconque de l'enceinte avec une direction tirée aléatoirement entre 0 et $2 \times \pi$ et chaque expérience durera 200 cycles de simulation.

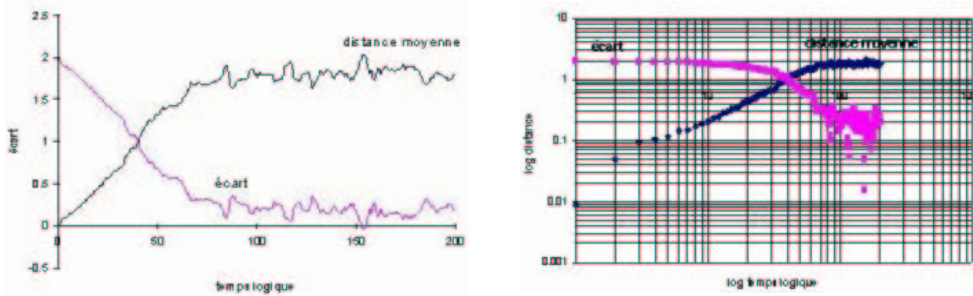


FIG. 5 – Croissance de l'entropie

Le premier graphique de la figure 5 montre une courbe décroissante qui illustre la progression de l'écart à chaque cycle entre la distance moyenne théorique et la distance moyenne mesurée. La courbe croissante, quant à elle, montre la croissance de la distance moyenne entre chaque instance molécule. On constate que cette grandeur converge vers une valeur limite qui n'est autre que ρ . Le deuxième graphique de la figure 5 montre les mêmes résultats dans un repère semi-logarithmique. Nous savons que la forme générale de l'entropie statistique, pour un processus stochastique stationnaire et ergodique, est $S = k \ln W$, où k est la constante de Boltzmann et W le nombre d'états accessibles au système. Ces états accessibles sont dénombrés grâce à un pavage de l'espace d'évolution des instances-molécules. Comme le cas du gaz parfait est particulièrement simple, l'espace d'évolution n'est autre que l'enceinte de confinement des molécules. Le comportement le plus probable pour ce genre de système est la répartition homogène et aléatoire des molécules dans l'espace. Ainsi, diviser notre enceinte par autant de *cellules* qu'il y a d'instances-molécules, et utiliser la distance théorique entre les instances, dans le cas où elles seraient idéalement réparties dans l'espace, est identique au pavage standard. Par conséquent, la distance moyenne *mesurée* est pertinente pour la mesure de l'entropie du système des instances-molécules. On remarque que la progression des 2 grandeurs mesurées, en particulier *distance moyenne*, est logarithmique dans le temps et durant la phase de croissance de l'entropie. Puis, cette croissance s'arrête lorsque le système a atteint son **état d'équilibre**, ou **état le plus probable**. Cet état correspond à celui dont

l'observation nous apporte le moins d'information au sens de Shannon.

En réalisant un nombre important d'expériences, en faisant varier les paramètres et conditions initiales, on peut s'appuyer sur des statistiques significatives pour conclure à une correspondance entre la progression de la ρ et S dans la relation théorique. Le programmeur, lui, retiendra que ce phénomène physique s'est manifesté indépendamment du code source. Le programmeur a mis dans son code un comportement individuel microscopique, mais, il n'y aucune instruction spécifiant explicitement comment passer du comportement individuel microscopique au comportement de groupe macroscopique. Pour *oRis*, et la machine qui exécute le code, il n'est pas question de molécules, ou de toute autre analogie physique. Il n'est question que d'objets au sens large, déroulant des instructions elles-mêmes manipulant (en lecture et en écriture) des données communément accessibles à tous les objets.

5.2 Temps logique et logique des temps en informatique

Il est important de vérifier que le temps total de simulation soit équitablement réparti entre toutes les instances. Pour ce faire on peut imaginer plusieurs types d'expériences montrant la linéarité de la répartition du temps, lorsque le nombre d'instances augmente [11]. En amont des expériences il faut comprendre la logique de cette répartition du temps dans les simulations informatiques. Nous savons qu'un programme objet est le lieu de création de très nombreux événements, eux-mêmes produits et traités par de nombreux processus. Pourtant, les logiques temporelles classiques [1], ne peuvent s'appliquer dans la pratique, qu'à des programmes faiblement déconcentrés. En POOA, nous pourrions certes imaginer que chaque objet actif mettent en œuvre des mécanismes de contrôle de la cohérence temporelle. Mais, dans la pratique cela n'est pas envisageable, tant les nombres d'événements et de processus peuvent être grands. De même, imaginer une *super*-instance possédant toute la logique temporelle va à l'encontre de la décentralisation logique du code.

Il ne faut pas parler d'un seul temps, mais bien **des** temps, tant les temporalités de l'observateur, de la machine, du moteur logiciel d'exécution et des instances peuvent être différentes. Or, lorsqu'on programme en suivant un modèle qui décentralise fortement la fonction logique du programme, il est paradoxal de constater que, si la logique temporelle est dans les objets actifs, elle ne l'est pas *explicitement*. C'est l'autonomie des OA qui assure la cohésion du programme, y compris la cohérence temporelle. À l'inverse, et paradoxalement, une logique explicitement écrite dans le code des OA limiterait l'autonomie des instances. En effet, toute logique temporelle est un ensemble de contraintes relativement fortes. Lorsqu'on choisit la POO, on fait le choix d'un style de programmation basé sur les classes, en choisissant la POOA, le style se centre sur les instances. Si le temps physique est considéré comme continu, dans les systèmes informatiques, le temps logique est fortement discontinu et, l'évolution des objets est subordonnée à la façon dont la machine désigne et exécute le code de chaque instance. Quel que soit l'algorithme de désignation implémenté dans le moteur de simulation, il se pose le problème de la gestion *des* temps. Nous pouvons établir une hiérarchie de ces temps, du plus continu au plus discontinu. Ou encore du temps le plus proche de l'observateur humain à celui qui en est le plus éloigné. La figure 6 montre l'imbrication de ces temps. Sur cette figure nous avons représenté un mode multi-tâches préemptif, puisque toutes les durées α sont égales. Par contre, par défaut, rien n'oblige à ce que les durées σ le soient. Nous pouvons imaginer une machine idéale de Von Neumann, constituée d'un processeur, d'une mémoire vive, d'un bus et d'un mécanisme de gestion des tâches subalternes. Cette machine

étant cadencée par l'horloge du processeur, cette horloge crée une première discontinuité par rapport au temps de l'observateur ou temps Ω . Nous dirons que cette horloge donne le temps CPU, ou temps π . Sur notre machine idéale nous supposons que le seul programme exécuté est une simulation par objets actifs parallèles, comme cela est possible avec *oRis*. Ce programme unique ne peut bénéficier de l'intégralité du temps π , puisque qu'il faut également exécuter un ensemble d'instructions de gestion. Ce temps du moteur de simulation ou temps σ , constitué de la somme des durées alloués, dans le temps π , au moteur de simulation, doit être partagé entre les instances et les instructions de gestion d'*oRis*, comme : la restitution des contextes, la désignation des threads. Ainsi, le temps σ est donc constitué, en partie, du temps des instances ou temps α . Ainsi, nous obtenons la relation c-dessous, où μ désigne une durée dans une *temporalité* donnée. Par exemple, une durée α , est le temps équivalent Ω , durant lequel, une instance particulière est active. Ces considérations nous permettent de poser les inégalités suivantes :

$$\sum_{\mu} \alpha < \sum_{\mu} \sigma < \sum_{\mu} \pi < \Omega \tag{2}$$

Cette imbrication, quelque peu complexe, impose à l'expérimentateur l'assurance d'une répartition équitable des moments σ dans les moments α .

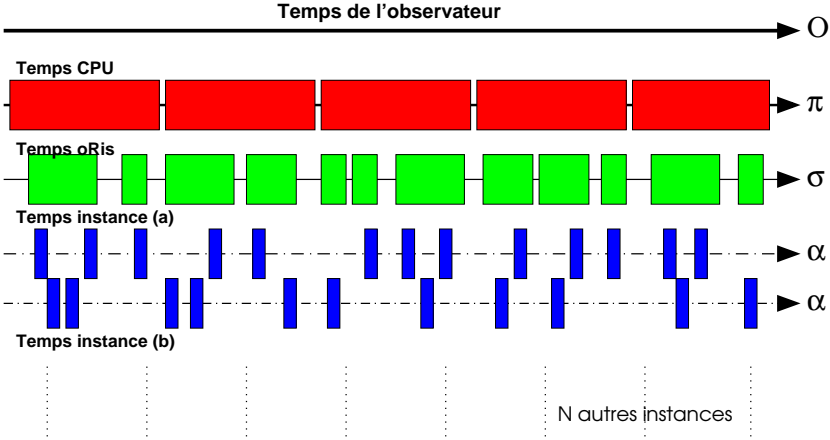


FIG. 6 – Imbrication des temporalités

6 Retour au laboratoire et conclusion

Les considérations de Brillouin doivent être comprises comme une interprétation de la théorie de Shannon. Elle-même, devant être vue comme la généralisation de la thermodynamique statistique de Boltzmann. Le laboratoire de Brillouin est riche en développements et en conséquences tant formelles que pratiques. Cette façon de considérer la volonté de l'observateur de réduire son ignorance, dans un cadre thermodynamique large, a cela de remarquable qu'elle est exportable à la quasi totalité des domaines scientifiques. La première difficulté résidant alors dans l'identification des 3 principaux acteurs du laboratoire. Dans notre cas, l'approche originale consiste à assimiler l'exécution d'un programme, et donc d'une simulation informatique, à un instrument de mesure. Comme il a été montré que l'exécution d'un programme

est un système physique, rien ne s'oppose plus à la mise en place des flux thermodynamiques prédits par la théorie.

Cette conception relativement nouvelle en informatique entraîne *de facto* plusieurs interrogations. En particulier, on doit s'interroger sur la nature de ses flux, et donc, des unités qu'il faudra mobiliser. Il nous manque en informatique une action caractéristique fixant les ordres de grandeurs impliqués. Quoiqu'il en soit, par sa volonté de réduire son ignorance sur l'état de l'objet qu'il étudie, l'observateur manipulateur doit consentir à emprunter de la négentropie à son instrument de mesure, et se faisant, participer à l'augmentation de l'entropie du laboratoire, mais aussi, et surtout pour ce qui nous intéresse ici, à l'augmentation de celle de l'instrument de mesure. Autrement dit, au fur et à mesure de la *mesure*, l'observateur perd de la connaissance instantanée et historique, sur l'état de son instrument de mesure. Ainsi, et il faut le souligner, l'interprétation des résultats de la simulation, ou son expertise, sera d'autant plus difficile qu'il va être difficile, et dans la pratique impossible, de tracer le chemin qui a conduit à la production du résultat par l'exécution du programme de simulation. Pour pallier à cette difficulté, des solutions, toutes partielles existent, mais la première d'entre elle réside en la qualification de la simulation en instrument de mesure. Il s'agit dès lors de vérifier jusqu'à quel point notre instrument de mesure est neutre et indépendant de l'objet de notre étude. Toute cette démarche doit nous permettre d'envisager la simulation informatique comme une technique légitime et maîtrisée d'accroissement de notre connaissance.

Références

- [1] J.F. Allen. An interval-based representation of temporal knowledge. In *proceedings of 7th IJCAI*, pages 221–226, Vancouver, Canada, 1991.
- [2] H. Atlan. *L'organisation biologique et la théorie de l'information*. Actualités scientifiques et industrielles. Hermann, 1972.
- [3] C.H. Bennett. Logical reversibility of computation. *IBM J. Res. Develop.*, pages pp. 525–532, 1973.
- [4] C.H. Bennett. Demons, engines and the second law. *Scientific American*, pages pp. 88–96, novembre 1987.
- [5] F. Boussinot. *Objets réactifs en JAVA*. Collection technique et scientifique des télécommunications. Presses polytechniques et universitaires romandes, CH - 1015 Lausanne, 2000.
- [6] L. Brillouin. *La science et la théorie de l'information*. Masson & Cie, Paris, 1958.
- [7] G. Cohen-Tannoudji. *Les constantes universelles*. Collection Questions de sciences. Hachette, 1995.
- [8] R. Cozien. Active object oriented programming for mobile robots software prototyping. In *actes du congrès Photonics East*, Boston, USA, novembre 2000. SPIE org.
- [9] R. Cozien and A. Colautti. Project dana : multi-agents simulations and fuzzy rules for international crisis detection : can we forestall wars ? In *actes du congrès SPIE99*, pages 94–105, Denver, USA, juillet 2000. SPIE org.
- [10] R. Cozien, J. Tisseau, and F. Harrouet. Simulations multi-agents flous d'une colonie d'insecte. In *actes des journées de Rochebrune*, number ENST 95 S 0001, pages 87–90. AFCET & ECAL, École Nationale Supérieure des Télécoms de Paris, février 1995.

- [11] R.F. Cozien. *Premiers éléments de la théorie du calcul singulier*. PhD thesis, Université de Champagne-Ardenne, octobre 2002.
- [12] B. Diu, C. Guthmann, D. Lederer, and B. Roulet. *Physique statistique*. Collection enseignement des sciences. Hermann, 1989.
- [13] F. Harrouet. *oRis : s'immerger par le langage dans les univers virtuels*. Mémoire de thèse, École Nationale d'Ingénieurs de Brest, EA 2215 - UBO & ENIB, décembre 2000.
- [14] M.T. Jaekel and P. Matherat. Dissipation logique des implémentations d'automates - dissipation du calcul. *Technique et science informatiques*, 15(n° 8/1996) :pp. 1079–1104, 1996.
- [15] É. Klein and M. Spiro. *Le temps et sa flèche*. Champs. Flammarion, 1994.
- [16] R. Landauer. Irreversibility and heat generation in the computing process. *IBM journal*, pages pp. 183–191, juillet 1961.
- [17] J. Rothstein. *Information and thermodynamics*, volume n° 85 of *Physical Review*. 1952.
- [18] Ch. Ruhla. *La physique du hasard - de Blaise Pascal à Niels Bohr*. Liaisons scientifiques. Hachette CNRS, 1989.
- [19] L. Szilard. On the decrease of entropy in a thermodynamic system by the intervention of intelligent beings. *Behavioral Science*, (Vol. 9) :pp. 301 – 310, 1964.
- [20] J. Tisseau, P. Chevaillier, F. Harrouet, and A. Nédélec. Des procédures aux agents - application en *oRis*. Rapport interne, LI2 - ENIB, février 1998.
- [21] W.H. Zurek. Thermodynamic cost of computation, algorithmic complexity and the information metric. *Nature*, 341 :pp. 119–124, 1989.

Une démarche expérimentale pour la simulation individus-centrée

Guillaume Deffuant*, Frédéric Amblard*, Raphael Duboz**, Eric
Ramat**

*Laboratoire d'Ingénierie pour les Systèmes Complexes (LISC)
Cemagref
24, avenue des Landais BP 50085
63172 Aubière Cedex
France

**Laboratoire d'Informatique du Littoral (LIL)
Maison de la Recherche Blaise Pascal
50, rue Ferdinand Buisson - BP 719
62228 Calais Cedex
France

email: guillaume.deffuant@cemagref.fr

Introduction

Les interrogations sur le statut de la simulation sont souvent liées à la pertinence du lien entre le modèle et ce qu'il est censé représenter (Varenne 2001), et donc au crédit que l'on peut prêter aux résultats d'une simulation. Le problème est donc alors de rapprocher une simulation d'une expérimentation sur l'objet qu'elle représente, et de comparer les statuts de ces deux types d'expérimentations. Le remplacement d'essais de bombes nucléaires réelles par des simulations dans plusieurs pays par exemple pose légitimement ce type de questions.

Nous nous plaçons cependant dans une perspective sensiblement différente : nous nous interrogeons sur le statut de la simulation en tant qu'expérimentation directe sur le modèle computationnel. Dans cette perspective, les simulations ont pour objectif premier de faire progresser la connaissance du fonctionnement du modèle, avant de faire progresser la connaissance du phénomène représenté.

Une telle démarche peut probablement paraître choquante, au moins pour deux raisons. Tout d'abord, ne faisons-nous pas des modèles pour nous aider à comprendre des phénomènes que nous ne comprenons pas ? Alors quel intérêt d'y substituer des modèles que nous ne comprenons pas non plus (puisqu'il faut les étudier pour les comprendre) ? Mais, plus profondément, un modèle est totalement spécifié par son concepteur, donc les moindres mécanismes en sont connus. Comment se peut-il qu'il faille encore l'étudier pour le comprendre ?

Nous tentons de montrer que la démarche expérimentale dans l'objectif de mieux comprendre le fonctionnement de certains modèles, notamment certains modèles individus-centrés, est parfaitement fondée. En effet, la connaissance totale des mécanismes les plus intimes de ces modèles ne permet pas d'en comprendre le comportement global. Cette caractéristique, souvent associée à une certaine conception de la complexité, permet d'envisager pleinement le modèle comme objet d'expérimentation, au même titre qu'un phénomène naturel.

Nous exposons ensuite le projet SimExplorer, qui a pour objectif de faciliter la mise en œuvre concrète d'une démarche expérimentale sur des modèles individus-centrés.

Le modèle computationnel et les défis de la complexité

Machine de Turing et complexité de Von Neumann

L'un des séismes intellectuels du XXI^{ème} siècle a été provoqué par le théorème de Gödel et son incarnation dans la machine de Turing. Cet événement nous intéresse particulièrement, car il fournit l'un des principes fondamentaux justifiant une démarche expérimentale sur des modèles computationnels. Ce principe est lié à une certaine forme de complexité, dont J.-P. Dupuy attribue la paternité à Von Neumann.

Résumons les principaux points de la lecture des événements faite par Dupuy : la machine de Turing a un fonctionnement dont les règles sont simples, et aisées à expliciter. Cependant, l'ensemble de ses comportements possibles¹ est infiniment plus difficile à expliciter, puisqu'ils échappent à toute formalisation récursive. La complexité au

¹ Notamment le fait qu'elle s'arrête ou pas en prenant certaines entrées

sens de Von Neumann est fortement inspirée par cette découverte. En effet, selon cette définition, une machine est complexe si l'ensemble de ses comportements possibles est infiniment plus difficile à caractériser que ses règles de fonctionnement. Ainsi, une machine très compliquée comme une centrale nucléaire, n'est pas complexe dans le sens de Von Neumann car l'ensemble de ses comportements est réduit : provoquer la réaction de fission contrôlée afin de produire de la chaleur.

La complexité, en ce sens précis, de certains modèles computationnels justifie leur statut d'objets d'expérimentations : leurs règles de fonctionnement, bien que totalement spécifiées par le programmeur, ne permettent pas de déduire leur comportement. Il est donc indispensable d'observer ce comportement par l'expérimentation, pour tenter éventuellement de produire une forme de théorie, plus compacte, de ce fonctionnement. Cet objet créé par l'homme est donc opaque à son propre créateur, qui doit appliquer une démarche scientifique pour comprendre sa propre création. Sa création devient pour lui équivalente à un phénomène naturel qu'il cherche à comprendre.

Cette situation prend l'allure d'un curieux retournement lorsqu'on l'observe à la lumière de la thèse de Hannah Arendt sur « l'Homo Faber ». Pour résumer grossièrement cette thèse, les sciences expérimentales (qui font la spécificité des sciences modernes) correspondent à une situation où l'homme ne comprend que ce qu'il fabrique. Il lui faut fabriquer la nature pour la comprendre. C'est ainsi que le laboratoire scientifique, en tant que structure, est le lieu de fabrication de phénomènes particuliers, contrôlés, qui peuvent par-là même être compris. C'est ainsi que les sciences fabriquent des modèles des phénomènes naturels, et les rendent alors accessibles à la compréhension humaine. L'idée centrale de cette thèse est que la découverte de règles de fonctionnement intime des phénomènes, nécessaire pour les fabriquer (voire les répliquer) permet d'accéder à leur compréhension et à la prédiction de leur comportement. Or, maintenant que l'homme fabrique des objets complexes au sens de Von Neumann, ce schéma est mis en défaut. En effet, la fabrication même de l'objet, et de ses règles de fonctionnement intimes, ne donne pas forcément accès à la compréhension de son comportement.

Cependant, ce comportement d'un système complexe artificiel peut faire l'objet d'une enquête scientifique classique, et ainsi donner lieu à l'élaboration d'un second modèle, qui donne à l'expérimentateur des clés plus accessibles, et permet notamment de faire des prédictions correctes du comportement du premier modèle. Les créations humaines dont les règles de fonctionnement les plus intimes sont totalement connues comme des modèles computationnels, peuvent donc devenir des objets d'investigation expérimentale. La simulation acquiert alors le statut d'expérimentation au même titre que l'expérimentation classique de laboratoire. Elle a simplement lieu dans un laboratoire « virtuel ».

Cette situation est particulièrement nette pour des modèles de phénomènes collectifs, c'est à dire fondés sur l'interaction de nombreux éléments.

Complexité des phénomènes collectifs

Une analogie, soulignée fortement par J.P. Dupuy, apparaît entre la complexité de Von Neumann, qui est « l'échappée » du modèle à son propre créateur, et la complexité depuis longtemps observée dans les phénomènes collectifs réels (en économie, en sociologie ou en écologie).

En économie, la fable des abeilles de Mandeville exprime parfaitement une sorte de déconnexion entre les mécanismes individuels et les mécanismes collectifs. On retrouve cette déconnexion dans la fameuse « main invisible » d'Adam Smith, ou sous sa forme moderne dans l'optimisation réalisée sur les lois du marché (par exemple chez Hayek). La figure ressemble à celle que nous avons identifiée dans la complexité de Von Neumann : même des hypothèses simplificatrices faites sur la connaissance intime des mécanismes de fonctionnement du système (ici le comportement d'individus rationnels) ne permettent pas de comprendre son comportement global. Bien sûr, le grand triomphe de l'économie classique, avec la théorie de l'équilibre général, est d'avoir construit un objet théorique qui permet de rendre compte des mécanismes constatés aux deux niveaux. Cette réussite est bien sûr remarquable, mais il n'est pas sûr qu'elle aplanisse totalement le fossé entre les deux niveaux. En effet, ce fossé est une hypothèse de la théorie elle-même, puisque les acteurs économiques sont supposés considérer

qu'ils n'ont pas d'influence individuelle sur les prix, alors que c'est bien la somme de ces influences individuelles qui fixe leur valeur. On garde donc, même dans les cas les plus favorables, une forme de déconnexion entre les mécanismes individuels, et les phénomènes collectifs qu'ils produisent.

La sociologie, dès sa fondation, se situe au cœur de cette complexité. En effet, personne ne va contester que les « faits sociaux » au sens de Durkheim sont des produits de l'activité humaine. Cependant, il est postulé qu'ils se situent à un niveau indépendant de celui des comportements individuels, ce qui justifie que leur étude fasse l'objet d'une démarche scientifique particulière, et justifie donc la création d'une discipline scientifique indépendante. Ici encore, une figure similaire à celle de la complexité de Von Neumann apparaît. La compréhension du phénomène n'est pas recherchée dans ses mécanismes les plus intimes (les comportements individuels), mais à un autre niveau (celui du phénomène collectif lui-même).

Nous nous garderons bien de pousser cette analogie jusqu'à en faire équivalence. Ici, nous nous distinguons de J.P. Dupuy qui semble parfois ne pas différencier les deux formes de complexité². En effet, il nous semble que la définition de Von Neumann, s'appuyant sur le théorème de Gödel et la machine de Turing universelle se justifie par une difficulté intrinsèque à caractériser l'ensemble des comportements de cette machine (à cause du théorème sur l'incomplétude des systèmes axiomatiques de Gödel). Or, cette caractéristique ne se retrouve pas forcément dans des phénomènes collectifs complexes. Il se peut très bien que l'ensemble des phénomènes collectifs produits par certains types de comportements individuels soient faciles à caractériser, et à comprendre, à leur niveau, alors même que le lien direct entre ces phénomènes collectifs et les comportements individuels garde une certaine opacité. On peut le constater sur des exemples dans le domaine de la physique : on a pu très tôt établir des lois entre la pression, le volume et la température d'un gaz (donc au niveau collectif), tout en ayant des théories, satisfaisantes à l'époque, au niveau du comportement des particules, sans être à même d'établir un lien direct entre les deux niveaux. Il a fallu pour cela développer

² la complexité de Von Neumann et la complexité des phénomènes collectifs

des outils de mathématiques statistiques sophistiqués. Même dans les cas où la déconnexion entre les deux niveaux est plus profonde, il se peut que les comportements collectifs puissent être caractérisés de manière simple. Nous considérons donc que la complexité des phénomènes collectifs a sa spécificité, même si elle présente une analogie formelle avec celle de Von Neumann.

Cette spécificité a été remarquée depuis longtemps. Elle s'exprime par des formules vagues telles que « la somme des parties n'est pas équivalente au tout » ou encore les différentes définitions, souvent tout aussi vagues, de l'émergence. Peut-être touchons-nous ici simplement à des limites de la compréhension humaine, qui ne peut pas prendre en compte, en même temps le comportement d'un grand nombre d'éléments qui s'influencent mutuellement. On voit bien que ce peut être le cas même lorsque les individus du système ont un comportement très simple. Ce seraient donc ces limites qui exigeraient de rechercher des explications directement au niveau collectif, en manipulant un nombre de descripteurs globaux plus restreint. Ainsi, selon (Atlan, 1986), le problème de la connexion entre niveau d'organisation est peut-être un faux problème. Les divisions et classifications de la nature viennent de la nécessité d'une construction réductionniste liée à la méthode scientifique elle-même. A chaque niveau d'organisation nous inventons donc un vocabulaire, un paradigme, un formalisme qui créent le contexte dans lequel nous raisonnons. Dans cette vision des choses, chaque niveau d'organisations est « un point de vue » sur la réalité qui développe ses propres méthodes pour comprendre et éventuellement prédire la nature à son propre niveau, dans son propre langage. Pour synthétiser la thèse d'Atlan, le changement de niveaux se fait par changement de paradigme, la connexion entre niveaux étant réalisée par l'observateur mais n'ayant pas d'existence en soit. Il reste que la compréhension de ce niveau et de ses lois requiert une démarche particulière, d'identification de ces descripteurs et des lois qui les régissent.

Cependant, ce lien entre des niveaux différents peut parfois être plus profond que l'observation de niveaux de description différents. Dans certains cas en effet, le niveau global rétroagit sur les comportements individuels. Certains auteurs utilisent l'existence de cette rétroaction comme définition de la complexité. On constate évidemment l'existence de telles situations dans les phénomènes sociaux (existence

d'institutions qui modifient le comportement), mais aussi en physique (lorsque le comportement individuel de particules crée un champ qui agit sur le comportement individuel).

Quel que soit l'angle de vision adopté, il apparaît que les mécanismes intimes du système (donc ici de ses éléments) ne permettent pas de déduire une compréhension de son comportement global. Une approche expérimentale pour établir les lois de ce comportement global est donc justifiée.

Une démarche expérimentale pour les simulations individuelles centrées

La simulation individus-centrée comme accès à la complexité des phénomènes collectifs

Les modèles de simulations individus-centrés sont au centre de ce débat sur la complexité et la vision de la simulation comme expérimentation. En effet, la caractéristique première de ces modèles est de se fonder sur une représentation explicite de l'ensemble des individus du système ainsi que de leurs interactions. Il s'agit donc d'une description des mécanismes au niveau des individus qui composent le système, par opposition à des modèles plus classiques, qui expriment des dynamiques (par équations différentielles par exemple) sur des variables agrégées (donc directement à un niveau global).

Le terme multi-agents qui peut parfois être compris comme synonyme à individus-centré, car certains modèles dits multi-agents (Doran, 1997 ; Drogoul et al., 1995 ; Drogoul et Ferber, 1994) implémentent en premier lieu des mécanismes individuels, leurs concepteurs tentant ensuite d'observer des régularités à un niveau collectif. Cependant, certains auteurs restreignant le terme multi-agents à des modèles dont les entités respectent certains critères plus ou moins bien définis (autonomie ou sociabilité par exemple), nous utiliserons de préférence le terme individus-centré, qui nous paraît être d'une acception plus large et plus claire.

Le prototype du modèle individus-centré est l'automate cellulaire, développé à l'origine par les physiciens, pour étudier les problèmes liés à l'agrégation (Toffoli et Margolus, 1987 ; Wolfram, 1986). Il

s'agit de l'illustration parfaite de la complexité des phénomènes collectifs : des automates extrêmement simples acquièrent des comportements globaux extrêmement riches, difficilement déductibles directement des dynamiques individuelles. Ici, les modèles sont étudiés pour leurs propriétés intrinsèques, au niveau collectif.

Beaucoup de modèles individus-centrés sont utilisés pour simuler des écosystèmes (Grimm 1999) ou des systèmes sociaux (Ferrand, 1999 ; Ballot et Weisbuch, 2000). Il est alors nécessaire de comparer le comportement global du modèle avec des données équivalentes dans les systèmes représentés. Cela ne fait que renforcer la nécessité de soigner le dispositif expérimental permettant de caractériser le comportement global observé dans les simulations.

On pourrait donc s'attendre à ce que la question du dispositif expérimental à mettre en œuvre dans le cadre de ces simulations fasse l'objet d'une réflexion poussée dans la communauté de modélisation individus-centrée. En fait, à notre connaissance, ce n'est pas vraiment le cas. Au contraire, certains constats (Grimm 1999) dénoncent le manque de temps et d'efforts passés à tester le modèle après son élaboration : on ne fait que quelques simulations qui sont sommairement comparées à quelques données.

Cependant, on peut identifier des particularités de l'expérimentation sur des modèles computationnels (comparée à l'expérimentation sur des systèmes physiques par exemple). Tout d'abord, le modèle computationnel offre l'avantage énorme de permettre facilement d'une part une automatisation des expérimentations et d'autre part la mesure de résultats qui ne subissent pas les biais de mesures classiques lors d'expérimentations sur des systèmes réels. Par ailleurs, les expérimentations sont faites dans l'objectif d'observer des régularités dans le comportement global du modèle, et de les lier à certaines autres variables, facilement interprétables, décrivant le modèle. Cet objectif particulier requiert de pouvoir exprimer les résultats globaux obtenus selon différents angles.

Exemple de recherche de régularités globales dans un modèle individu centré

Nous considérons l'exemple du modèle d'influence sociale développé dans le cadre du projet IMAGES (Deffuant, 2001), afin d'illustrer nos

propos. Nous en resterons à une description qualitative de ce modèle, qui est suffisante pour notre propos. En effet, nous nous focalisons sur la recherche d'un lien entre des valeurs de paramètres de la dynamique, et des caractéristiques globales de sa dynamique. Nous insistons sur la difficulté principale qui est de déterminer les variables agrégées pertinentes, et ensuite l'exploration de l'espace nécessaire pour établir les liens.

Décrivons donc rapidement ce modèle (voir Deffuant et al., 2002 pour les détails). Les individus sont caractérisés par une opinion continue, initialisée par une distribution uniforme entre -1 et 1 , et un autre paramètre (continu lui aussi) de certitude (ou de conviction) en cette opinion. On suppose qu'aux extrêmes de l'axe d'opinion, un certain pourcentage p_e d'individus sont des extrémistes, c'est à dire qu'ils ont une certitude très forte (ils sont tous initialisés à u_e), alors que le reste de la population est plutôt incertain (initialement, tous les individus ont la même incertitude U). La dynamique met en œuvre des rencontres entre deux individus choisis aléatoirement dans toute la population. Les individus modifient leur opinion au cours de cette rencontre selon des règles mathématiques dont nous ne donnerons que les effets qualitatifs : tout d'abord une réelle modification des opinions n'a lieu que si elles ne sont pas trop éloignées l'une de l'autre (en tenant compte des paramètres d'incertitude) Par ailleurs, les individus convaincus sont plus influents que ceux qui ne le sont pas.

Nous nous intéressons à l'influence des extrémistes sur le reste de la population. Une première exploration aléatoire de l'espace des simulations fait apparaître trois types de dynamiques (voir figure 1). Ces dynamiques sont caractérisées par la convergence vers des groupes d'opinions homogènes et stables. Le premier type correspond à une influence faible des extrêmes, donc une population dont les groupes finaux sont en majorité hors des zones extrêmes définies à l'initialisation. Le second type présente une bipolarisation de la population vers les extrêmes. Enfin dans dernier type de dynamique, un seul des extrêmes attire la majorité de la population. En fait, le troisième type a été mis à jour très tard, car il correspond à des valeurs des paramètres un peu inhabituelles (très grande incertitude U de la majorité de la population).

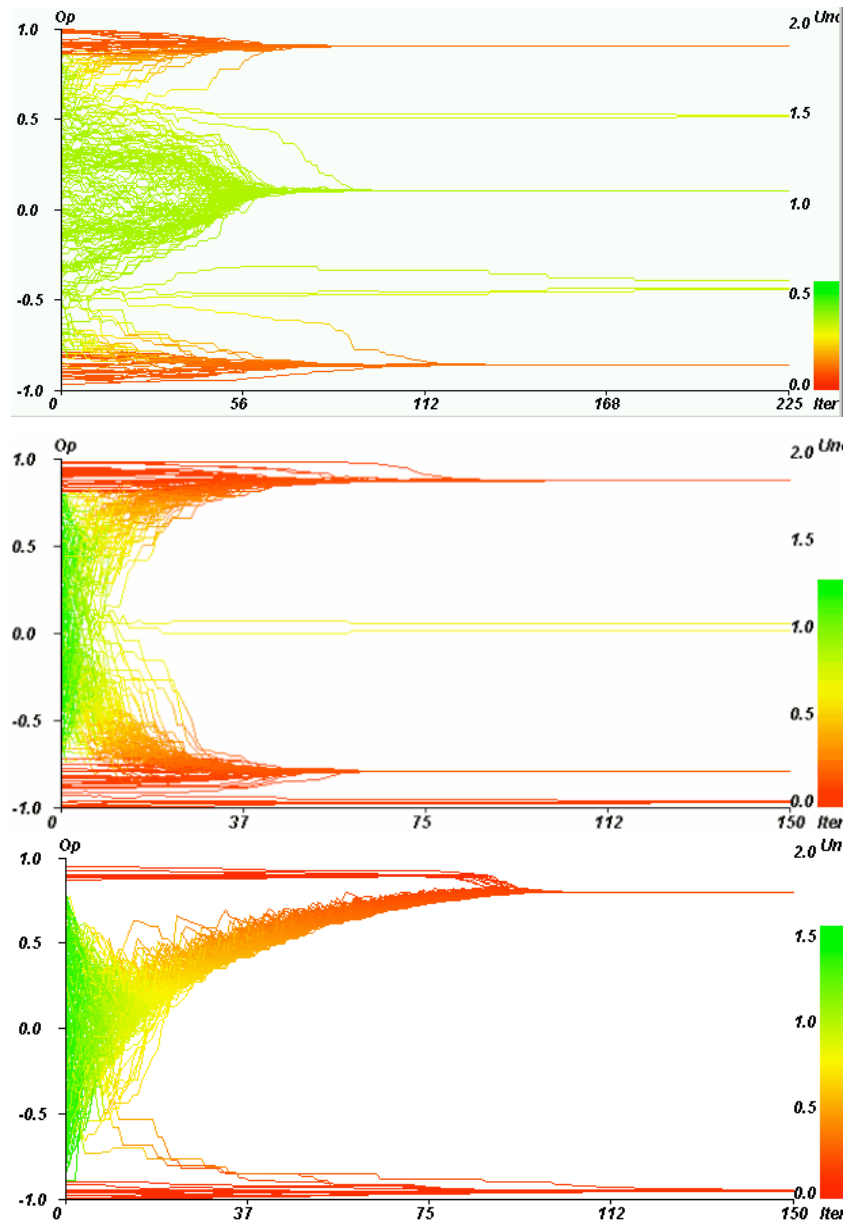


Figure 1: Les trois cas de convergence observés, de haut en bas, convergence centrale, convergence vers les deux extrêmes et convergence vers un seul extrême.

Nous voulons examiner la manière dont les différents types d'attracteurs se répartissent dans l'espace des paramètres. Il s'agit de prévoir le type de convergence en fonction des valeurs de ces paramètres (proportion d'extrémistes, incertitude des modérés notamment).

Nous exprimons donc tout d'abord les résultats de l'exploration à l'aide d'un indicateur de type de convergence (central, deux extrêmes

ou un extrême) noté y . Pour calculer l'indicateur y , nous considérons la distribution des opinions après convergence:

- Nous calculons les proportions p'_+ et p'_- des agents initialement modérés qui sont devenus extrémistes positifs ou négatifs.
- L'indicateur est défini par: $y = p'_+{}^2 + p'_-{}^2$.

La valeur de cet indicateur indique le type de convergence (cf. table 1):

Valeur de y	0	0.5	1
Type de convergence	Centrale	deux extrêmes	Un seul extrême

Table 1: Interprétation des valeurs de y . Les valeurs intermédiaires correspondent à des convergences intermédiaires.

En utilisant cet indicateur, nous pouvons établir un lien entre des valeurs de paramètres U et p_e à la distribution des valeurs de l'indicateur y pour un ensemble de simulations faites à partir de ces valeurs. La figure 2 fait apparaître les moyennes de ces distributions de valeurs de y pour 50 répliques de simulations, ainsi que les écarts type. La figure 3 fait apparaître l'histogramme des valeurs de y pour les 50 répliques sur une ligne de la figure 2 (pour p_e constant). En fait, de telles cartes doivent être multipliées pour l'ensemble des valeurs des autres paramètres (notamment les paramètres de la dynamique).

Ce travail nous a permis d'identifier un ensemble de régularités dans le comportement global du système. Nous avons constaté que ces cartes présentent deux formes qualitatives différentes (selon que le nombre d'extrémistes est le même en chaque extrême ou pas). L'une de ces formes est présentée par la figure 2. Même un très petit déséquilibre entre les deux extrêmes provoque le passage d'une forme à l'autre. Ces formes typiques (voir figure 2) présentent des zones de l'espace dans lesquelles le comportement qualitatif du modèle est homogène. Dans certaines zones au contraire, on constate des changements brusques du fonctionnement qualitatif du modèle, ou encore des changements plus continus.

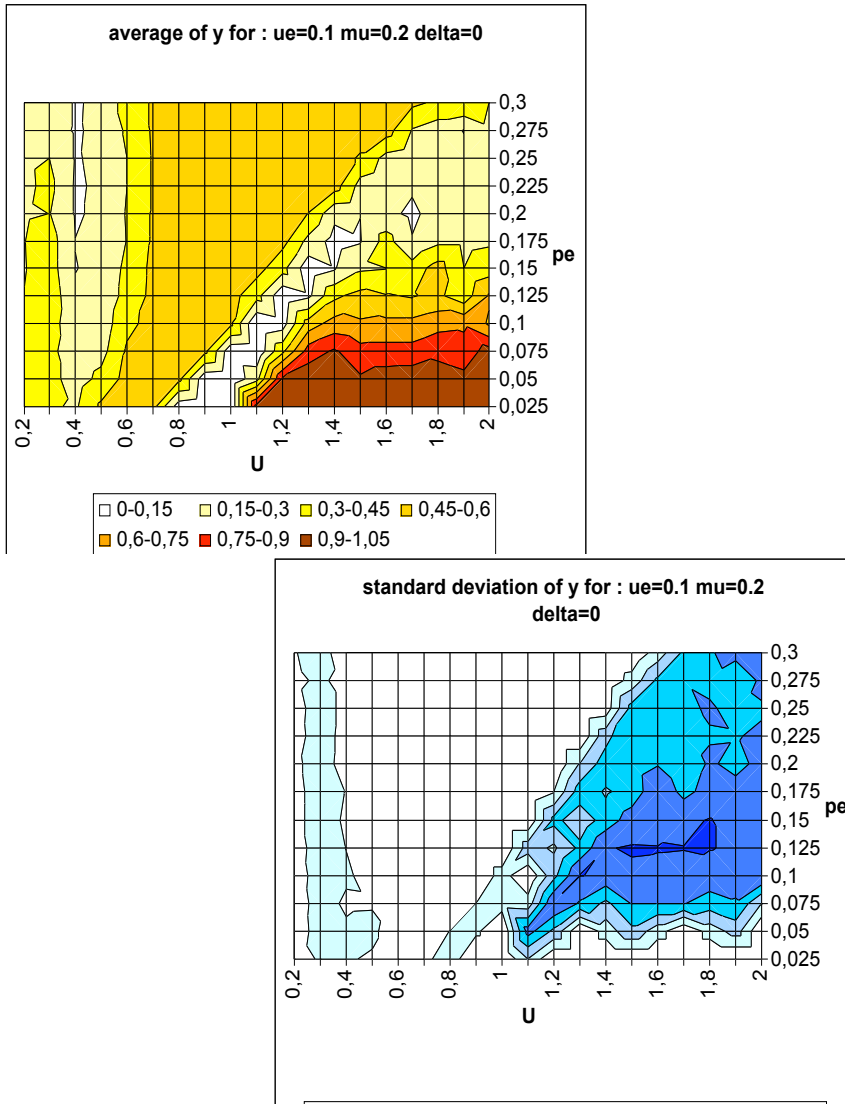


Figure 2: Formes typiques de la moyenne et de l'écart type de l'indicateur y (50 réplifications à chaque point du graphe) en fonction de l'incertitude des agents modérés (U) et de la proportion globale d'extrémistes (p_e). Sur le graphe représentant les moyennes de y , les zones jaunes et blanches à gauche correspondent à une convergence centrale, la zone orange au milieu à une convergence vers deux extrêmes et la partie marron en bas à droite à une convergence vers un seul extrême.

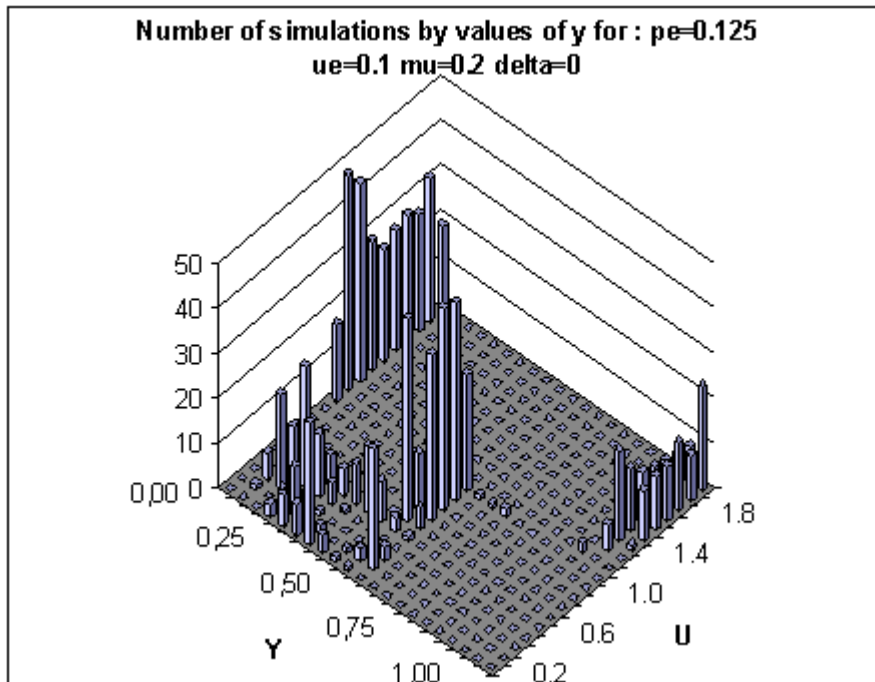


Figure 3: Histogrammes des valeurs de l'indicateur y pour $p_e = 0.125$. Pour U suffisamment grand ($U > 1$) les même paramètres conduisent suivant les réplifications soit à un clustering central soit à un clustering vers un seul extrême (y proche de 0 ou proche de 1). Au milieu, U ($0.5 < U < 1$) nous avons uniquement un clustering vers les deux extrêmes (y proche de 0.5). Pour U faible ($U < 0.5$), l'histogramme montre différentes convergences qui sont intermédiaires entre une convergence centrale et une convergence vers deux extrêmes (avec des proportions différentes d'agents qui ont rejoint les extrêmes).

A partir de l'analyse de ces figures et de leurs régularités, il devient possible de proposer une théorie explicative du fonctionnement global du modèle (ce qui est esquissé dans Deffuant et al., 2002). On examine alors en détails l'évolution de certains exemples typiques de simulations dans les grandes zones identifiées, et on introduit des approximations de type champ local moyen.

Rien que pour ce petit modèle, on constate la nécessité de pratiquer un grand nombre d'expérimentations pour établir correctement une certaine compréhension de son comportement global. Insistons sur le fait que cette compréhension est nécessaire comme préalable à la question plus classique de l'adéquation du modèle à des phénomènes particuliers (sociaux en l'occurrence). On comprend sur cet exemple

l'intérêt d'un outil permettant de rendre ce travail plus systématique, et de capitaliser sur les expériences passées.

Le projet SimExplorer : vers un outil générique d'expérimentation sur des modèles individus-centrés

Le projet SimExplorer est porté actuellement par le LISC (Cemagref), conjointement à d'autres équipes notamment l'Université du Littoral et le groupe de réflexion autour de MIMOSA (animé par J.P. Muller du CIRAD). Ce projet s'appuie sur une démarche expérimentale de l'exploration des modèles individus-centrés. L'objectif est de faciliter la mise en œuvre d'une telle démarche, afin de la rendre plus rigoureuse et plus systématique. Il s'agit aussi de tenir compte des particularités des modèles individus-centrés pour développer des types d'expérimentations qui leur sont propres. Nous présentons tout d'abord le noyau du projet SimExplorer, puis des projets de modules d'expérimentations plus particulières.

Le noyau du projet SimExplorer

Le noyau de SimExplorer est actuellement en cours de développement au LISC. Ce logiciel doit à terme s'adapter facilement à différents modèles et permettre de lui appliquer une démarche expérimentale. L'outil doit intégrer la possibilité de créer des plans d'expérience classiques (Kleijnen, 1987 ; Kleijnen et Groenendaal, 1992), afin de parcourir au mieux l'espace des paramètres du modèle. Il doit permettre de lancer les simulations, de récupérer les résultats et d'en assurer certains traitements.

La définition des structures informatiques décrivant le modèle et les simulations prend en compte la spécificité des modèles individus-centrés. En effet, dans la structure descriptive du modèle, on distingue :

- la population des individus du modèle individus-centré, définis par des objets et leurs attributs,
- les variables régissant la dynamique du modèle, c'est à dire celles des individus, ainsi que des leurs interactions,
- des variables de scénarios, qui définissent des évènements venant de l'extérieur, à certains pas de temps de la simulation (par exemple

les élagages pour un modèle de peuplement forestier, ou les pêches pour un modèles de poissons).

La structure descriptive d'une simulation (une expérience) comprend :

- L'ensemble des conditions initiales sur les valeurs des attributs définissant les individus. Souvent, ce sont les valeurs de paramètres de distributions statistiques qui définissent ces conditions initiales. Parfois ce sont des données qui sont issues d'un fichier de mesures.
- Les valeurs des paramètres de la dynamique, y compris le temps de simulation ou ses conditions d'arrêt.
- Un ensemble de valeurs des paramètres de scénario.

Les plans d'expériences peuvent porter sur l'ensemble des paramètres tous types confondus ou seulement sur l'une des catégories. Par ailleurs, des contraintes permettant de ne pas tester certaines combinaisons de paramètres peuvent être directement précisées dans l'interface.

L'utilisateur peut spécifier les différents types d'agrégation qu'il désire effectuer (et à quels pas de temps) sur les attributs de la population. Ces résultats peuvent être stockés sous différentes formes.

Une fois le plan d'expérience et les types de sorties souhaitées établis, SimExplorer lance les différentes expérimentations avec l'ensemble des spécifications de conditions initiales, de paramètres de la dynamique et de scénario, ainsi que les spécifications sur les sorties souhaitées. Il est prévu que l'outil gère également le lancement de ces simulations sur plusieurs machines en parallèle.

Reste ensuite à établir un lien entre les valeurs des paramètres et certains indicateurs agrégés pertinents. Une grande part du travail consiste à déterminer ces indicateurs pertinents et les liens statistiques entre leurs valeurs. Les analyses de sensibilité, peuvent être obtenues en faisant des différences sur les variables agrégées pour différentes valeurs de paramètres de simulation. Des outils conviviaux offrant le moyen de définir facilement ces variables agrégées sont donc d'un grand secours.

L'un des enjeux importants pour SimExplorer est de s'adapter facilement à de nombreux modèles. Ceci permettrait une diffusion

plus large de la pratique des simulations dans une démarche pleinement expérimentale.

En outre, un outil comme celui-ci ouvre la porte à des recherches sur des protocoles expérimentaux particuliers, adaptés à certains types de modèles. Les paragraphes suivants donnent quelques exemples que nous prévoyons d'investiguer.

Expérimentations sur des distributions initiales et des structures spatiales

La particularité principale des modèles individus-centrés est de représenter explicitement l'ensemble des individus du modèle. Une expérimentation requiert donc de spécifier les valeurs initiales des attributs de ces individus. Souvent cette initialisation est faite par des tirages selon des distributions de probabilité. Ces hypothèses d'initialisation peuvent avoir des conséquences importantes sur le comportement ultérieur du modèle. Il est donc important d'évaluer cette influence avec soin lorsqu'on cherche à comprendre un modèle. Nous prévoyons d'inclure dans SimExplorer la possibilité d'utiliser des distributions classiques pour initialiser les modèles.

Cependant, il est également important d'évaluer l'influence du nombre d'agents sur le comportement du modèle, notamment lorsque l'initialisation des attributs est faite par des tirages selon une distribution. En effet, plus le nombre d'individus est faible, plus la variabilité est importante, ce qui rend les tendances et les régularités plus difficiles à établir. Il peut donc être intéressant de tester les modèles avec de grands nombres d'individus afin de limiter cette variabilité. Il est donc nécessaire d'inclure la taille de la population comme paramètre à tester dans les expériences.

Par ailleurs, lorsqu'on utilise des distributions issues de données de relevés (pour des peuplements forestiers par exemple), l'utilisation d'indicateurs agrégés caractérisant la distribution spatiale peuvent être pertinents pour établir des régularités entre la distribution et la dynamique elle-même (Goreaud, 2000). De tels indicateurs peuvent être utiles également pour des initialisations par des distributions de probabilité artificielles. Il est donc intéressant d'intégrer de tels outils dans SimExplorer.

Expérimentations sur les structures d'interactions

Nous considérons maintenant des modèles individus-centrés particuliers, fréquents en modélisation sociale, dans lesquels les interactions entre les individus sont définies par un graphe (le réseau social). Nous supposons ici que ce graphe est statique. Nous supposons aussi, bien sûr que les individus sont définis par un ensemble d'attributs dont les valeurs sont initialisées en début de simulation, et évoluent ensuite, notamment à cause des interactions entre les individus reliés par le graphe.

Un des problèmes intéressants posé pour ce type de modèle est d'évaluer l'influence de propriétés générales du graphe sur la dynamique globale du modèle. Par exemple, on peut s'intéresser à la formation de groupes homogènes d'agents, et à l'influence de la structure du graphe sur la formation et l'évolution de tels groupes.

Nous proposons différents tests à réaliser pour caractériser l'influence de la forme de la structure d'interactions sur le comportement du modèle. Nous adoptons la métaphore d'un graphe sur lequel on pose une distribution, chaque nœud prenant une valeur particulière de cette distribution.

Nous envisageons d'intégrer à SimExplorer un module permettant de tester des variations sur les graphes d'interactions afin de tester l'influence de leur structure sur la dynamique. Pour cela, différentes stratégies d'évolution du graphe sont possibles. L'utilisation d'indices caractéristiques issus de la sociologie des réseaux (Wasserman et Faust, 1994), de même que les indicateurs de distribution spatiale, fournit des indicateurs agrégés qu'il peut être intéressant de d'examiner conjointement aux caractéristiques de la dynamique. Il est donc important de pouvoir disposer de tels outils, qui peuvent grandement améliorer la compréhension du modèle au niveau global.

L'incorporation de telles méthodes dans SimExplorer permettraient de les utiliser systématiquement pour différents modèles. Cet outil devrait donc nous permettre d'améliorer notre démarche d'expérimentation sur les modèles individus-centrés, en la rendant plus rigoureuse et plus systématique.

Conclusion

Nous défendons une approche expérimentale de la simulation individus-centrée. Nous justifions cette position par la complexité des modèles computationnels, en particulier à cause de la déconnexion entre dynamiques individuelles et phénomènes collectifs. En effet, souvent la connaissance fine des dynamiques individuelles ne permet pas de déduire directement le comportement global du modèle. Une démarche expérimentale est donc nécessaire afin d'établir les liens entre des variables agrégées décrivant le modèle globalement. A partir de la constatation expérimentale de tels liens, des modèles théoriques au niveau global peuvent être proposés. Cependant, la littérature fait plutôt apparaître un déficit de rigueur et de systématisation dans les expérimentations numériques sur les modèles individus-centrés.

Le projet SimExplorer vise à faciliter et améliorer cette démarche expérimentale, tout en tenant compte des spécificités des modèles individus-centrés. Il s'agit de développer une interface de mise en œuvre d'expérimentations sur des modèles individus-centrés. Cette interface proposera un ensemble de fonctions permettant de définir un plan d'expériences sur le modèle, et les variables agrégées à observer. Nous prévoyons aussi le développement de modules spécifiques permettant d'explorer l'influence de la répartition spatiale des individus, ou encore l'influence de la structurer du graphe d'interactions entre les individus. Nous souhaitons la rendre adaptable à différents modèles le plus facilement possible, et ainsi en faciliter l'utilisation et la diffusion.

Nous pensons que cet outil permettra de faire progresser la réflexion sur les méthodes de traitement systématiques des résultats. On pense bien sûr aux méthodes de fouilles de données qui offrent des perspectives séduisantes pour déterminer des régularités dans ces résultats. En outre, la démarche d'expérimentation prend son sens dans une itération entre la définition du plan d'expérience et l'exploitation des résultats. L'automatisation partielle de ce processus itératif est un défi passionnant que cette démarche permettra d'aborder dans le futur.

Remerciements

L'ensemble de l'équipe du LISC contribue à la définition et au développement de SimExplorer. Nous tenons donc à mentionner la participation active à ce projet de I. Alvarez, S. Bernard, M. Edwards, T. Faure, F. Goreaud, D.Hill, S. Huet et J.Truffot.

Références

- Arendt, H. (1958). *Condition de l'homme moderne*. Calman-Lévy.
- Ballot, G. et Weisbuch, G. (2000). *Applications of Simulation to Social Sciences*. Hermès.
- Bousquet, F., Cambier, C., Mullon, C., Morand, P., Quensière, J. et Pavé, A. (1993). Simulating the interaction between a society and a renewable resource. *Journal of Biological Systems*, 1, 199-214.
- Deffuant, G. (2001). *Final report of project FAIR 3 CT 2092. Improving Agri-environmental Policies: A Simulation Approach to the Cognitive Properties of Farmers and Institutions*. <http://wwwlisc.clermont.cemagref.fr/ImagesProject/default.asp>
- Deffuant, G., Amblard, F., Weisbuch, G. et Faure, T. (2002). How can extremism prevail ? A study based on the relative agreement interaction model. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 5, <<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/5/4/1.html>>.
- Doran, J.E. (1997). From computer simulation to artificial societies. *Transactions of the Society for Computer Simulation International*, 14, 69-78.
- Drogoul, A., Corbara, B. et Fresneau, D. - Manta: new experimental results on the emergence of (artificial) ant societies. In N.Gilbert et R.Conte (eds.), *Artificial Societies: The Computer Simulation of Social Life*, UCL Press, 1995.
- Drogoul, A. et Ferber, J. - Multi-agent simulation as a tool for studying emergent processes in societies. In J.E. Doran et N. Gilbert (eds.), *Simulating Societies: The Computer Simulation of Social Phenomena*, UCL Press, 127-142, 1994.
- Dupuy, J.-P. (1992). *Introduction aux sciences sociales, Logiques des phénomènes collectifs*. Ellipses.
- Dupuy, J.-P. (1994). *Aux origines des sciences cognitives*. La Découverte.

- Ferrand, N. (1999). *Modèles et systèmes multi-agents pour la gestion de l'environnement et des territoires*. Cemagref Editions.
- Goreaud F. (2000). *Apports de l'analyse de la structure spatiale en forêt tempérée à l'étude et la modélisation des peuplements complexes*, Thèse de doctorat ENGREF.
- Grimm, V. (1999). Ten years of individual-based modelling in ecology: what have we learned and what could we learn in the future? *Ecological Modelling*, 115, 129-148.
- Kleijnen, J.P.C. (1987). *Statistical tools for simulation practitioners*. Marcel Dekker Inc. Pub.
- Kleijnen, J.P.C. et Groenendaal W.V. (1992). *Simulation a Statistical Perspective*. Wiley.
- Legay, J.-M. (1997). *L'expérience et le modèle, un discours sur la méthode*. INRA éditions.
- Lorrain and White (1971). Structural equivalence of individuals in social networks. *Journal of Mathematical Sociology*, 1, 49-80.
- Toffoli, T. et Margolus, N. (1987). *Cellular Automata Machines*. MIT Press.
- Varenne, F. (2001). What does a computer simulation prove ? The case of plant modelling at CIRAD (France). In Proceedings of the ESS'01 conference, Marseille (France), 549-554.
- Wolfram, S. (1986). *Theory and Applications of Cellular Automata*. World Scientific.

Simulation Orientée Agent: où sont les agents ?

Alexis Drogoul, Diane Vanbergue, Thomas Meurisse

LIP6 – Université Paris 6 – 4 Place Jussieu 75252 PARIS CEDEX 05
{Alexis.Drogoul, Diane.Vanbergue, Thomas.Meurisse}@lip6.fr

Résumé. Ce papier est consacré aux relations existant entre les agents computationnels, tels qu'ils sont étudiés dans les Systèmes Multi-Agents (SMA), et les techniques regroupées sous le nom générique de «Simulation Orientée Agent» (SOA). Son objectif est de montrer que la SOA, en dépit de son nom, est en réalité rarement implémentée à l'aide de ces agents. Nous basons cette démonstration sur une présentation du processus méthodologique utilisé dans le développement des systèmes actuels de SOA qui consiste en une définition des différents rôles impliqués dans le processus de conception, et nous permet de montrer que la notion d'«Agent», bien que partagée à un niveau conceptuel par les différents participants, n'implique pas un usage systématique d'agents computationnels dans les systèmes déployés. Nous concluons par une discussion sur ce que l'usage d'agents computationnels pourrait apporter à la SOA, en fournissant un certain nombre de pistes de recherche.

1. Introduction

1.1. Simulation Orientée Agent

La simulation orientée agent est aujourd'hui utilisée dans un nombre croissant de secteurs, où elle remplace progressivement les différentes techniques de micro-simulation [1], de simulation orientée objets [2] ou individu-centrée [3] utilisées jusqu'à présent. Ceci est dû, pour une part, à sa capacité à appréhender des modèles très différents d'«Individus», depuis des entités très simples (par le biais d'agents «Réactifs» [4]) jusqu'à des entités plus complexes (sous la forme d'agents cognitifs [5]). La facilité avec laquelle, au sein d'un cadre conceptuel unifié, différents niveaux de représentation (par exemple, «Individus» et «Groupes») peuvent être manipulés par le modélisateur est également une de ses qualités souvent mise en avant, par rapport, par exemple, à ce qu'offrent les automates cellulaires [6]. Cette versatilité apparente fait de la SOA le support de choix pour la simulation de systèmes complexes, et, s'il faut en croire les actes des événements qui lui sont consacrés (i.e., MABS, SimSoc, etc.), elle se diffuse dans un nombre croissant de domaines : sociologie [7,10,11,13], biologie [8,14], physique [15], chimie [8], écologie [9], économie [12] etc.

1.2. Syntaxe et Sémantique

Ce succès est cependant ambiguë. Bien que la plupart des chercheurs semblent s'accorder sur une terminologie commune pour désigner les concepts centraux des systèmes multi-agents utilisés en SOA, il apparaît de plus en plus que cet accord est, au mieux, syntaxique. La sémantique associée diffère considérablement d'un modèle à un autre, ou d'une implémentation à une autre. Qu'ont les agents décrits dans MANTA [14] de commun avec ceux utilisés dans les travaux de Sichman [16] ? Rien à part l'étiquette. Comment se fait-il qu'il soit habituellement impossible de comparer deux implémentations différentes de la même «spécification» (voir par exemple ces différents articles sur Sugarscape [17,18,19]) ? Quelles sont les différences entre les plate-formes actuellement disponibles, comme Swarm, MadKit, StarLogo, CORMAS, etc. et laquelle choisir pour un projet particulier ? Ce flou, au niveau computationnel, sur ce *qu'est réellement un agent*, se retrouve dans tous les autres niveaux conceptuels requis pour la conception de simulations. Les experts du domaine (ou *thématiciens*) ont au mieux une idée vague de ce qui est réellement autorisé dans la définition de leurs modèles. Contrairement à la simulation numérique, où leurs connaissances doivent être traduites en définitions de variables et de relations entre ces variables, la SOA autorise, en théorie, une diversité de représentations bien plus importante : formules, règles, heuristiques, procédures, etc. Cette richesse est source de confusion 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).

En effet, dans la plupart des travaux de recherche en SOA, les langages utilisés par les thématiciens, les modélisateurs et les informaticiens, bien que syntaxiquement compatibles, cachent souvent des disparités sémantiques importantes [10,20]. Aussi longtemps que ces incohérences restent implicites et ne donnent naissance à aucune incompatibilité majeure, elles peuvent être «masquées» avec l'aide — malheureusement traditionnelle — de petits «arrangements» au niveau computationnel. La conséquence est qu'il n'y a plus, à ce moment-là, de garantie que ce qui est conçu et implémenté correspond à ce qui a été désiré et modélisé par le thématicien [45]. De plus, dans le cas des systèmes multi-agents, une autre conséquence de ces incohérences est que la seule façon de s'accorder sur une notion commune d'«agent» consiste à la rendre le plus «faible» possible, c'est-à-dire la plus consensuelle étant donnés leurs différents

profils. Un «agent» est alors décrit comme une entité «autonome», «proactive», «interagissante», mais nous allons montrer dans cet article que ces propriétés, définis à un niveau très métaphorique, ne sont pas traduites en propriétés computationnelles. Les agents computationnels décrits en IAD ou en SMA [5] ne sont tout simplement pas utilisés par la SOA.

Afin d'illustrer cette opinion, nous présentons, en section 2, un tour d'horizon des principales et plus récentes propositions méthodologiques à destination de la SOA. Nous montrons qu'elles sous-estiment la plupart des difficultés de construction d'un modèle computationnel, ce qui nous amène à proposer, en section 3, notre propre cadre méthodologique (décrit de façon plus détaillée dans [21]). Nous utilisons ce cadre, dans la section 4, pour détailler les modèles dans lesquels le concept d'agent est utilisé et concluons, en section 5, sur les bénéfices que l'utilisation de modèles computationnels réellement orientés-agent pourraient fournir à la SOA. Les hypothèses et opinions exprimées dans cet article sont basées sur l'expérience que nous avons accumulée ces dix dernières années dans la participation à des projets de SOA, que ce soit en biologie [14], physique [22], sociologie [23] ou économie [12].

2. Concevoir des SOA – Méthodologies

2.1. Fishwick [24,25]

Fishwick, dans [24], définit la simulation informatique comme la discipline regroupant les trois activités suivantes – conception du modèle d'un système réel ou théorique, exécution de ce modèle sur un ordinateur, et analyse des résultats de cette exécution. L'étape «*model design*» (conception du modèle) associe le système réel avec une représentation de ce système (le *modèle*). Les données utilisées pour la construction de ce modèle peuvent être des «observations réelles» (des valeurs numériques) ou des connaissances (un point de vue plus subjectif sur le système) et sont habituellement formalisées par le biais d'une sémantique formelle ou d'une logique mathématique, afin d'en réduire les ambiguïtés. Elles sont ensuite traduites en algorithmes, qui s'exécuteront sur un ordinateur durant les étapes de «*model execution*» (exécution du modèle) pour produire des résultats numériques. La troisième étape, appelée «*execution analysis*», consiste en l'analyse des résultats et en leur comparaison avec les comportements observés dans le modèle.

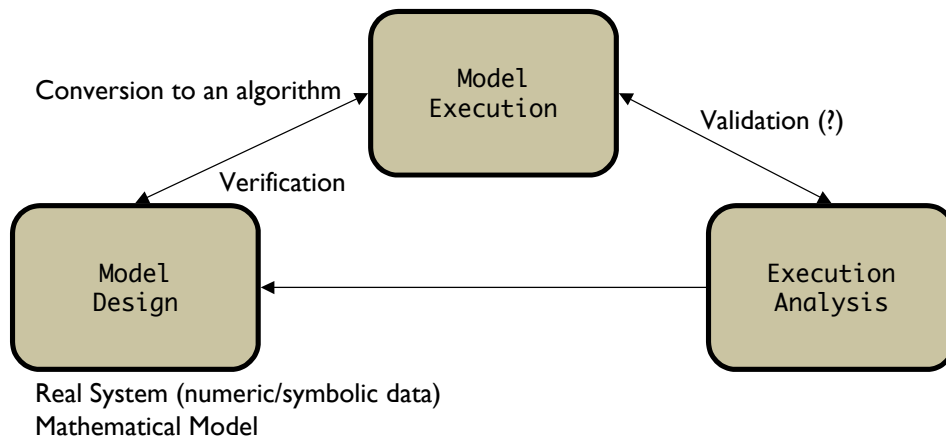


Fig. 1. La simulation comme une succession de tâches, vue par Fishwick (d’après [24])

Généralement, les chercheurs sont plus intéressés par l’étape de conception du modèle [Fishwick96]. Son exécution, ainsi que l’analyse subséquente de cette exécution, sont perçus comme des travaux à valeur scientifique moindre, plus concernés par la mise au point de techniques spécialisées (exécuter le programme et analyser ses résultats peut être automatisé dans certains cas). Cette étape de conception se limite donc à *“how we should design and engineer models from concepts to something that can be executed on a computer”* [25].

Chacune de ces étapes (conception, exécution, analyse) est étroitement couplée aux deux autres, et le processus de simulation global consiste en un nombre fini d’itérations entre elles. Le problème de cette proposition est que la traduction du modèle initial en un modèle computable apparaît comme «*naturelle*». Aucune étape intermédiaire n’est prévue entre la conception et l’implémentation d’un modèle, alors que, comme le souligne Doran: *“[any] implementation of a model (...) will likely raise major problems because of the many ways in which particular specified abilities may be refined into computational detail.”* [26]

2.2. Gilbert et Troitzch [27,11,2]

Gilbert et Troitzsch [27] raffinent quelque peu ce diagramme (figure 2) en ajoutant précisément cette étape intermédiaire□ celle de *construction* (informatique) *du modèle*. Une fois que le modèle a été conçu, sa traduction dans quelque chose d’utilisable sur un ordinateur implique bien l’écriture d’un «*programme spécial*». Cependant, ils font remarquer qu’aucun langage de programmation n’est à l’heure actuelle capable de fournir au concepteur tous les prérequis indispensables à la construction d’un programme de simulation (structuré, efficace, autorisant un raffinement incrémental et un déverminage facile, avec de bonnes bibliothèques graphiques, compréhensible aussi bien par le modélisateur que par

l'informaticien). La conversion d'un modèle en un algorithme n'est donc pas aussi triviale que le suggère Fishwick (et peut conduire à des problèmes bien connus de non-répliquabilité, comme le montre Axelrod dans [28]), mais, à part souligner ce fait, les deux auteurs ne détaillent aucune autre étape éventuelle entre ces deux représentations.

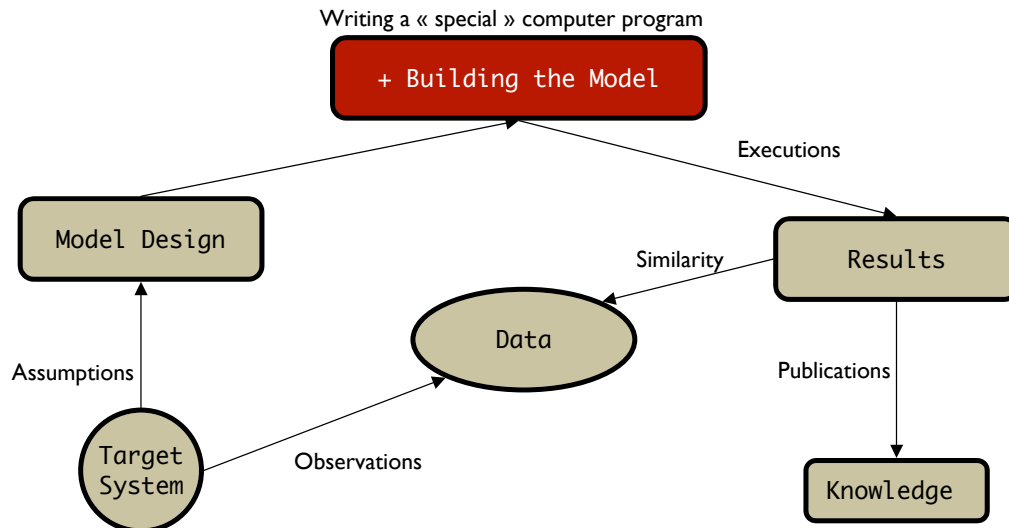


Fig. 2. Proposition méthodologique de Gilbert and Troitzch (ce diagramme n'apparaît pas dans [27] et constitue une interprétation de notre part)

3. De la conception comme un « jeu de rôles »

Ces deux propositions, bien qu'elles soient utiles pour comprendre comment concevoir une simulation, ont cependant, par rapport à la perspective tracée en section 1, deux défauts importants (1) elles ne concernent pas spécifiquement la simulation *multi-agent*, mais plutôt la simulation informatique en général (2) elles sont orientées-tâches, plutôt qu'orientées-modèles, et ne permettent donc pas de comprendre les difficultés liées à la traduction de modèles.

Dans le but de circonscrire ces difficultés et, éventuellement, d'y apporter des solutions, il est important de comprendre *qui produit quoi* durant le cycle de vie d'une simulation avant de détailler, comme dans les diagrammes précédents, *comment et quand* cette production a lieu [29]. Commençons donc par décrire les rôles impliqués dans la conception, c'est-à-dire les différents acteurs qui vont interagir pour produire une simulation fonctionnelle, ainsi que leurs contributions¹.

¹ Cette notion de « rôles » a été déjà implicitement utilisée par Edmonds ([29]) sans être réellement explicitée.

Nous pouvons les définir intuitivement de la façon suivante : d'un côté, nous avons un système cible, qui caractérise le phénomène à prédire ou la théorie à expliquer. Ce système fait intervenir des experts d'un ou plusieurs domaines ou thèmes: nous les appellerons *thématiciens*. Tout au bout de la chaîne, comme la simulation est censée s'exécuter sur des ordinateurs, nous avons besoin d'experts en informatique pour construire le programme : les *informaticiens*. Enfin, ainsi que le montre Fishwick dans [25], le fossé conceptuel entre ces deux communautés (thématiciens et informaticiens) pouvant être assez important, un troisième rôle semble nécessaire, qui servira d'«*interface*» entre les deux précédents : celui de *modélisateur*.

3.1. Le thématicien

Le thématicien définit l'intention du processus de simulation, c'est-à-dire l'association qui sera faite entre le système cible et l'application de la simulation. Il manipule trois sortes de données concernant le système cible [46] : des théories et hypothèses (ce qu'il sait ou estime), des observations (ce qu'il voit ou analyse), des questions (ce qu'il veut comprendre). Nous avons pu observer (dans certains de nos travaux [14,12,23,22,6] et dans la littérature) que les thématiciens intéressés par la SOA possédaient un profil similaire : ils manipulaient au moins deux niveaux de connaissance, que nous appellerons respectivement leurs micro- et macro-connaissances. Les macro-connaissances constituent un ensemble de connaissances «*globales*» sur le système cible, souvent tirées d'observations. Les micro-connaissances comportent les connaissances locales sur les «*individus*» sans lesquels le système cible n'existerait pas : elles sont composées à la fois d'observations et d'hypothèses. Ces thématiciens s'engagent dans la conception de SOA précisément parce qu'il leur est nécessaire de pouvoir représenter ces deux niveaux, notamment pour expliciter l'impact des comportements «*individuels*» sur le système cible, dans les situations où ils ne sont pas en mesure de le faire de façon déductive ou analytique.

Dans un formalisme orienté-agent, même intuitif, les micro-connaissances sont traduites dans un *modèle du domaine*, qui contient des «*agents*» pourvus des comportements issus des observations, théories ou hypothèses pertinentes (figure 3). Ce modèle est défini en utilisant un langage spécifique au domaine considéré (qui a pour sémantique celle associée par le thématicien au système cible), souvent peu formel. Les macro-connaissances, quant à elles, sont utilisées plus tardivement, dans la constitution de scénarios ou de mesures pour les résultats de la simulation. Dans le modèle du domaine, le thématicien manipule des agents «*réels*», c'est-à-dire des agents qui peuvent être observés et analysés dans le système cible.

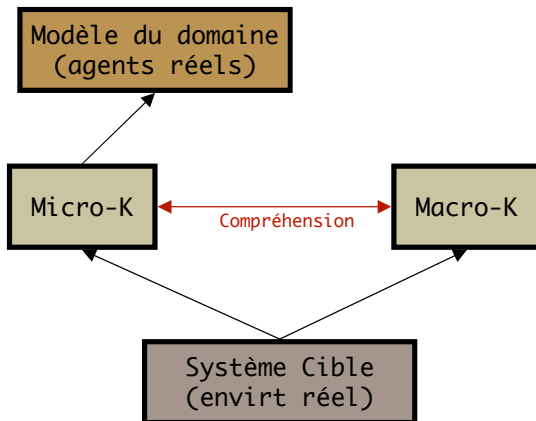


Fig. 3. Données et modèles manipulés par le thématicien

Bien entendu, dans la majorité des cas, les théories associées au système cible ne définissent pas un ensemble consistant d'hypothèses. Par exemple dans les sciences sociales, où, comme le montre [26], la plupart des théories restent sujettes à controverses et souvent ambiguës d'un point de vue computationnel. C'est pourquoi il est nécessaire de s'atteler à la constitution d'autres modèles intermédiaires avant de réellement construire le programme de simulation [29].

3.2. Le modélisateur

Comme les spécifications du thématicien ne permettent pas une transcription directe en une solution opérationnelle, le modèle du domaine doit être traduit en un modèle plus formel qui pourra, éventuellement, être considéré pour implémentation par les informaticiens. Ceci est la tâche du *modélisateur*. Son rôle essentiel est de clarifier les concepts utilisés, de supprimer les ambiguïtés potentielles, en spécifiant ce que nous appelons un *modèle de conception* (ou *modèle conceptuel*). Pour comprendre l'intérêt de ce modèle, il est possible de se le représenter comme étant à une implémentation orientée-agent ce que les diagrammes UML sont à un programme orienté-objet.

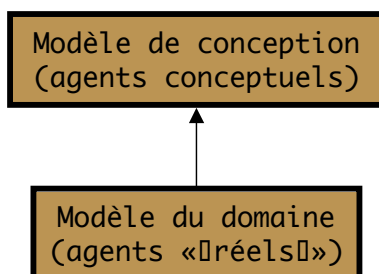


Fig. 4. Modèles manipulés par le modélisateur

Le modélisateur s'intéresse à des *agents conceptuels*, qui constituent un raffinement formel des précédents. Leurs propriétés sont en particulier exprimées par le biais des concepts étudiés par les SMA [5] : architectures comportementales, interactions, communications, environnement, modèles de perception et d'action, etc. (voir figure 5), sans pour autant être liées à des implémentations spécifiques (plate-formes ou de modèles d'exécution). Le modèle de conception est probablement le modèle le plus difficile à concevoir, dépendant qu'il est des informations fournies par le thématicien et des contraintes inhérentes au type d'implémentation choisie (qui peut ou non être connue à cette étape de la conception). Sa construction est rarement immédiate et va plutôt résulter d'itérations successives entre ces deux niveaux [47]. Cela lui confère, cependant, une fonction primordiale de lieu de discussion et d'interaction entre les trois rôles.

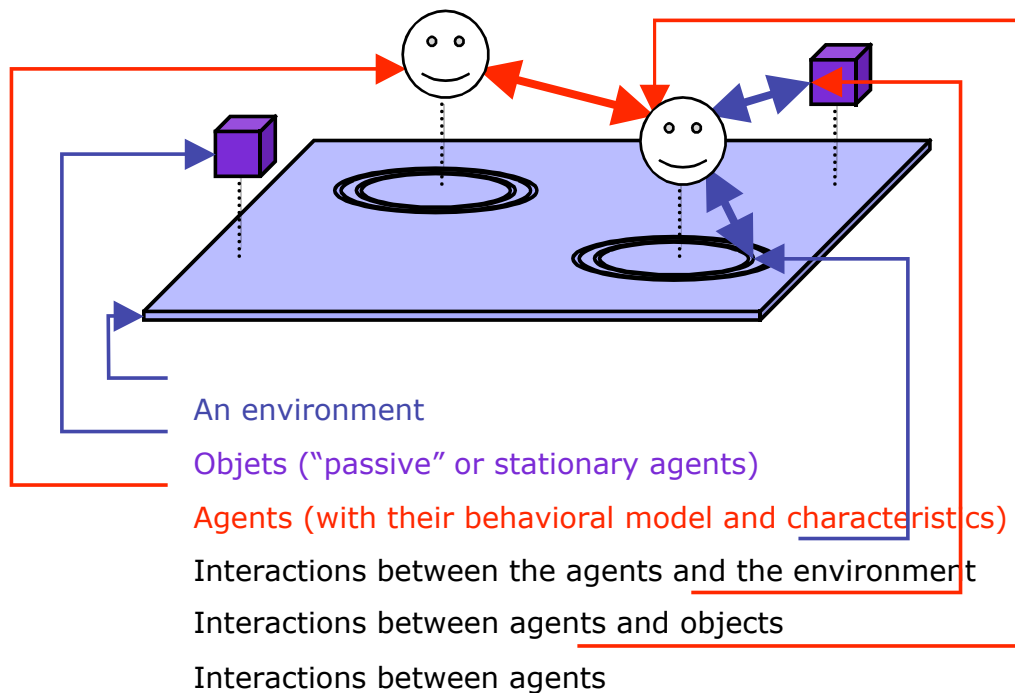


Fig. 5. Un exemple du type d'informations contenues dans le *modèle de conception*

3.3. L'informaticien

Le but de l'informaticien n'est pas simplement d'écrire le programme correspondant (bien que ce soit sans doute sa tâche principale), mais également de proposer un modèle qui puisse servir à faire le lien avec celui du modélisateur. Sans cet autre modèle intermédiaire, ses propositions et choix ne pourraient facilement faire l'objet d'un quelconque retour de la part des deux autres rôles.

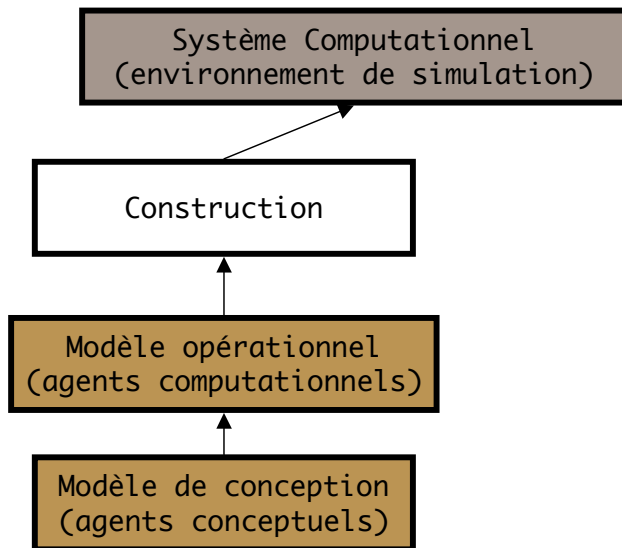


Fig. 6. Modèles pris en charge par l'informaticien

Définir ce *modèle opérationnel* est une opération qui précède immédiatement la construction du système computationnel. Dans ce modèle, l'informaticien devrait s'intéresser à des *agents computationnels*, c'est-à-dire des agents envisagés comme technique d'implémentation (comme les objets, par exemple). La sémantique associée au modèle opérationnel est donc en partie définie par les possibilités qu'offre l'implémentation.

Dans la plupart des projets existants, ce modèle est souvent négligé au profit d'une implémentation directe, ce qui est en partie dû au fait que l'informaticien, dans beaucoup d'institutions, est toujours considéré comme un simple «*exécutant*» [39]. Mais il est important de comprendre que son point de vue sur l'implémentation, exprimée normalement dans le modèle opérationnel, permet aux deux autres rôles de comprendre, et éventuellement de modifier, ce qui va être implémenté. En particulier, en spécifiant des propriétés techniques comme la distribution physique des agents, les techniques d'ordonnancement temporel utilisées, etc. et en leur donnant une existence dans le modèle global, ce travail permet de faciliter la comparaison inter-modèles ou de comprendre l'impact de spécificités purement computationnelles sur l'émergence de structures artefactuelles dans une simulation [41].

3.4. Résumé et discussion

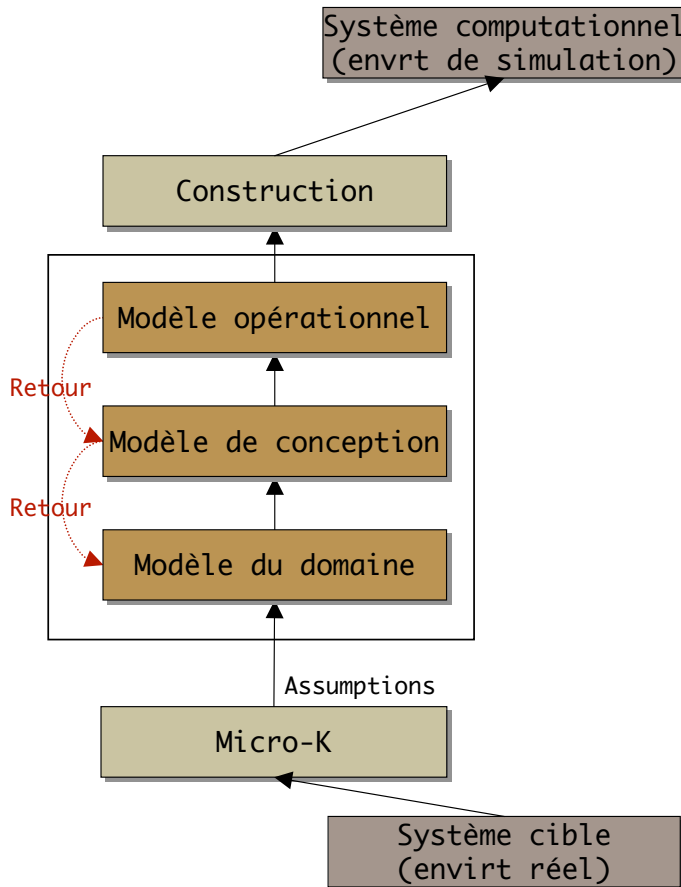


Fig. 7. Le processus de conception

Dans la description du processus de conception, nous associons chaque modèle (du domaine, de conception et computationnel) à un rôle spécifique. Il est important de noter que les personnes activement impliquées dans la conception de simulations ne sont pas forcément au fait de l'existence de ces trois rôles. En particulier, cette décomposition est rarement réalisée en respectant une association stricte entre rôle et acteur. Il arrive ainsi fréquemment qu'une et une seule personne joue deux rôles différents. Par exemple, un expert du domaine, si ce dernier se prête bien à une transcription quasi-formelle (et donc, peu ambiguë, voir sur ce point [15]), pourra incarner à la fois le rôle de thématicien et celui de modélisateur. De la même façon, l'informaticien pourra jouer le rôle de modélisateur si ses connaissances lui permettent d'appréhender correctement le domaine du système cible (c'est le cas, par exemple, de MANTA [14]). Pour des systèmes cibles très simples, un même acteur peut éventuellement jouer les trois rôles simultanément, ce qui est par exemple le cas quand un thématicien décide d'implémenter des solutions opérationnelles évidentes (dans le cas de modèles analytiques comme des

systèmes simples d'équations différentielles ou pour rapidement tester des idées dans des environnements ad-hoc comme StarLogo [8]). Néanmoins, il n'est pas recommandé de systématiser le recours à ce type de solutions, en particulier dans le cas de systèmes cibles complexes, car, d'une part, modélisateurs et informaticiens possèdent habituellement un savoir-faire unique et, d'autre part, une confusion entre les rôles mène souvent à des solutions qui excluent toute facilité de maintenance ou d'évolutivité.

Si nous connectons correctement les modèles pris en charge par ces trois rôles, nous obtenons le diagramme de la figure 7, qui décrit seulement la partie « descendante » du processus de conception, c'est-à-dire la succession de modèles qui part de l'environnement réel pour aboutir à l'environnement de simulation. L'intégralité du processus (sur laquelle nous ne nous étendrons pas ici car ce n'est pas notre propos, mais dont une description détaillée se trouve dans [21]) est représentée sur le figure 8, dont les couches horizontales correspondent aux domaines respectifs de responsabilité des différents rôle. the horizontal layers of which correspond to the different roles. Dans l'un et l'autre de ces diagrammes, toutes les itérations sont bien entendu possibles entre chacun des modèles utilisés, bien que, pour des raisons de clarté, nous n'y ayons fait figurer que les plus évidentes.

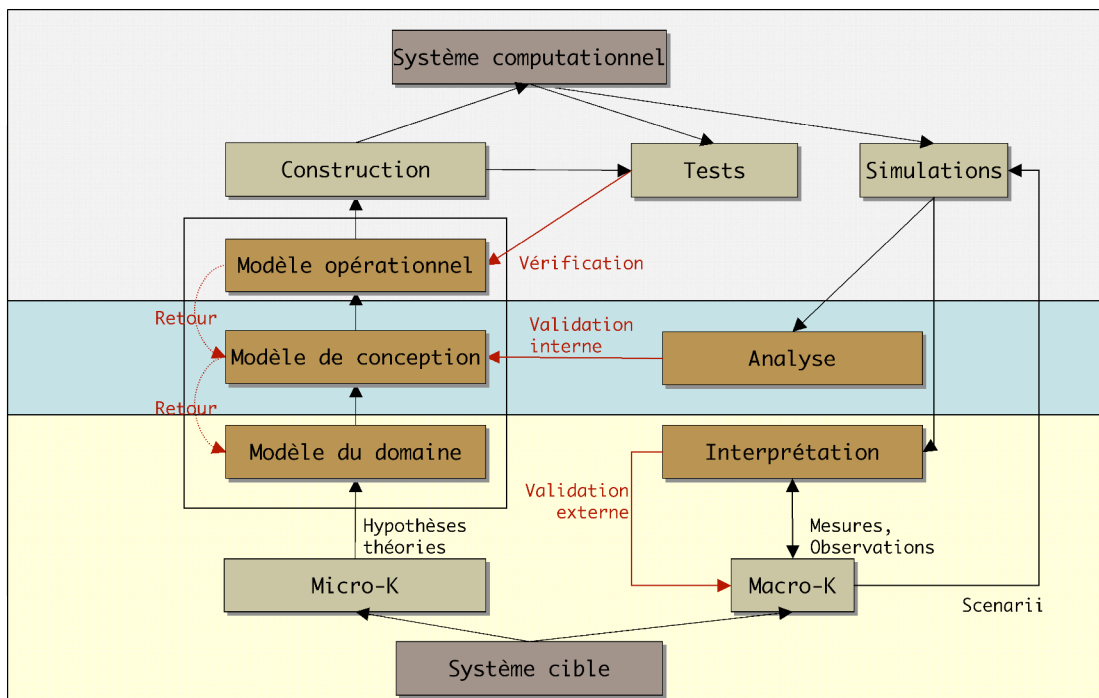


Fig. 8. Le cadre méthodologique « complet »

Ce diagramme définit un cadre méthodologique qui doit servir lors de la conception de SOA, mais il peut également être utilisé comme cadre

d'évaluation de SOA existantes. En particulier, il peut aider les chercheurs à situer leurs contributions ou leurs responsabilités dans le contexte d'une conception déjà réalisée. En ce qui nous concerne, il va nous servir à appréhender plus finement la façon dont les «agents» sont réellement utilisés dans les simulations multi-agents.

4. Agents (computationnels) ?

4.1. Où trouve-t-on les agents ?

De façon théorique, chacun des rôles définis dans la section précédente est censé jouer avec une notion d'«agent», qu'elle soit formelle ou non. Cependant, comme nous l'avons montré en section 1, cet accord apparent est principalement syntaxique, et ne doit pas faire accroire à l'existence d'une *lingua franca* qui transcenderait, par ses simples vertus terminologiques, les frontières entre des domaines de recherche relativement éloignés les uns des autres. Les «agents» servant à façonner chacun des modèles sont de toutes les façons définis différemment (en raison de la différence entre les sémantiques sous-jacentes et, partant, entre les langages utilisés par les trois rôles) à titre d'exemple, bien que les agents décrits dans le modèle du domaine servent de base à ceux qui peupleront le modèle opérationnel, ils seront certainement moins formalisés ou formalisés de façon différente. Idéalement, il devrait être possible de tracer un parallèle entre l'usage des «agents» dans les SOA et l'utilisation des «objets» dans la programmation orientée-objet [5]. Ces derniers sont utilisés dans l'analyse, comme support pour les opérations de réification, dans la conception, comme support des différents diagrammes (par exemple ceux d'UML), et dans la programmation, grâce à une sémantique opérationnelle précise et à l'existence de langages offrant une manipulation directe des abstractions nécessaires (héritage, instanciation, etc.).

De façon similaire, les agents peuvent être trouvés dans le modèle du domaine, comme *supports métaphoriques* d'individus considérés comme autonomes, proactifs, communicants et interagissants. Ils sont également présents dans le modèle de conception, comme *supports conceptuels* utilisés pour formaliser la définition de ces individus dans des termes plus objectifs. Mais, à notre connaissance, ils ne sont présents, à l'heure actuelle, dans aucun des modèles opérationnels présentés dans la littérature. Au lieu d'utiliser des langages orientés-agent (et la sémantique qui leur serait associée), les informaticiens préfèrent utiliser des langages orientés-objet, logiques, fonctionnels ou procéduraux pour implémenter les spécifications décrites dans le modèle conceptuel. Ceci signifie que les

«Les agents computationnels» résultants (s'il est encore possible de les appeler ainsi), ne possèdent aucune des propriétés généralement associées aux agents utilisés dans les SMA ou l'IAD [5] : ils n'ont pas d'autonomie structurelle ou décisionnelle, aucune proactivité, et ne peuvent pas, par exemple, modifier leurs comportements et leurs connaissances par apprentissage ou adaptation.

Nous n'utilisons pas d'agents pour implémenter les simulation multi-agents, mais simplement pour les concevoir, d'abord parce qu'ils sont plus simples à manipuler et (en raison de l'absence de toute sémantique opérationnelle contraignante) offrent une plus grande expressivité que les objets ou les fonctions au thématicien ou au modélisateur.² La raison principale est d'abord à trouver dans la faiblesse relative de l'ingénierie logicielle dédiée aux SMA: beaucoup de méthodologies et de langages ont été proposés et sont disponibles, mais aucun engagement en faveur d'une sémantique opérationnelle unique n'a abouti jusqu'à présent (ce point est développé dans [26,27]).

La conclusion de tout ceci est qu'à l'heure actuelle, les *agents constituent un modèle relativement commode pour représenter des entités autonomes, mais qu'ils ne sont pas autonomes eux-mêmes dans l'implémentation de ces modèles.*

4.2. Pourquoi utiliser des agents computationnels en SOA ?

Comme aucun projet ne semble utiliser d'agents computationnels pour implémenter les agents conceptuels, il est légitime de s'interroger sur l'intérêt à utiliser des agents computationnels dans une simulation. Nous pensons que oui, ne serait-ce que parce qu'il n'y aucune raison pour que la conception d'une simulation soit à ce point différente de la conception de toute autre application. Au-delà des techniques employées aujourd'hui (objets, composants, etc.), les agents computationnels représentent clairement le futur de l'informatique (voir, par exemple [28]). Afin de rendre concrètes les possibilités qu'offrirait l'implémentation des SOA en agents computationnels, nous pouvons décomposer leur utilité potentielle en quatre applications possibles (choisies en raison de leur généralité, dans la mesure où elles sont applicables à tout projet quel que soit son domaine) : la conception participative, l'interprétation assistée par agents, l'adaptation au niveau du système, et la calibration assistée par agents.

²Ce qui, au passage, permet d'expliquer la relative popularité des SOA...

4.2.1. Conception participative de simulations

L'une des plus grandes difficultés de la conception de SOA réside dans la formalisation des comportements des agents d'après les observations ou les théories auxquelles le thématicien a accès. Il s'agit d'une opération d'extraction de connaissances qui peut nécessiter de nombreuses itérations avant que son résultat ne satisfasse les concepteurs. Le développement récent des *simulations participatives* a ouvert, pour résoudre cette difficulté, un nouveau champ de recherches, en invitant experts et non-experts à définir, interactivement ces comportements par l'intermédiaire d'un jeu de rôles ou d'une immersion comme «agents humains» dans des simulations en cours [29]. Les comportements ainsi extraits sont cependant toujours implémentés manuellement par les informaticiens.

Des agents dotés de capacités d'apprentissage et d'une certaine forme d'autonomie décisionnelle seraient utiles pour automatiser ce processus d'extraction. Ils pourraient, par exemple, jouer un rôle double (voir figure 9) : celui d'abstractions computationnelles pour l'implémentation de la simulation et celui, simultané, d'«agents assistants» [30] attachés à un expert ou à un utilisateur. L'objectif est qu'ils puissent ainsi acquérir ou ajuster, par interactions répétées avec (ou observations de) leur «tuteur», les comportements pertinents et les contextes qui leur sont associés, sans que ceux-ci n'aient besoin d'être formalisés.

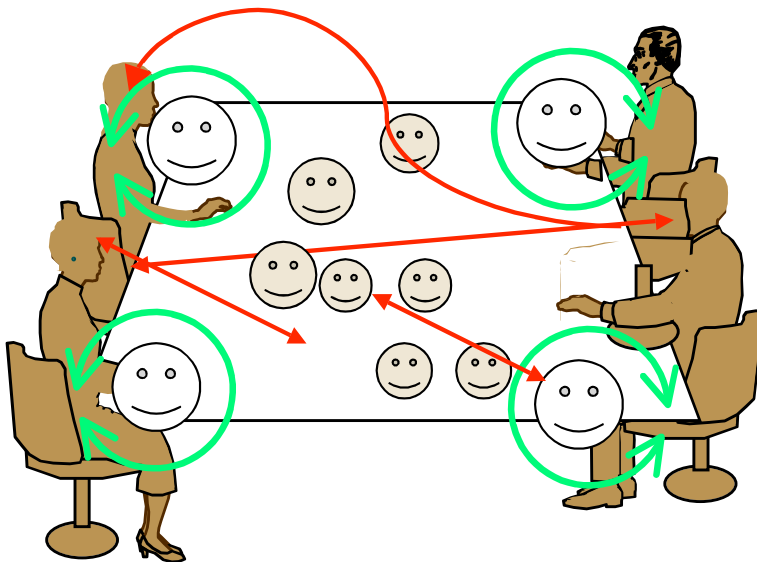


Fig. 9. Conception participative, comportant des agents autonomes et des humains

L'expert «tuteur», par le biais d'une interface dédiée, le rôle qui lui a été confié au sein de la simulation, l'agent «observe», puis «propose» des comportements qui peuvent être amendés en temps réel par l'expert, ces modifications étant prises en compte par l'agent au même titre que les

résultats de son observation. Ceci requiert bien entendu des procédures d'apprentissage en ligne un peu particulières, qui font l'objet de recherches actives dans de nombreuses sous-disciplines de l'IA, en particulier en robotique □ autonomie ajustable [31], apprentissage par imitation [32], apprentissage par démonstration [33], apprentissage social [34], apprentissage interactif situé [35], etc. Un de leur principal intérêt est que l'agent apprend son comportement «*in situation*» et de façon progressive, et que l'expert est réellement impliqué dans ce processus d'apprentissage [37]. L'inconvénient réside cependant dans le fait qu'elles nécessitent des formalismes dépendants des domaines envisagés pour représenter actions et contextes, ce qui signifie qu'il n'existera pas avant longtemps de techniques génériques. Il est également probable que tous les domaines ne se prêtent pas forcément à une forme interactive de conception. Cependant, nous sommes confiants dans le fait que ce type d'approche, qui, par le biais de l'apprentissage, replace les agents computationnels au centre de la SOA, fera partie de la boîte à outils de tout modélisateur dans les années à venir.

4.2.2. Interprétation assistée par agents

Dans les systèmes à grande-échelle qui font intervenir des milliers ou des millions d'agents, la dynamique de la simulation peut être, de façon surprenante, aussi compliquée à comprendre que celle du système cible [38]. La complexité générée par le nombre d'agents, surtout quand ils interagissent de façon probabiliste, est similaire à celle d'un système naturel ([22] en est un bon exemple dans le domaine hydrologique). Avoir accès à l'intégralité des informations (paramètres, etc.) ne garantit en rien que l'analyse des résultats sera simplifiée, quand elle ne la complexifie pas.

Pour faciliter cette analyse, une solution pourrait être de fournir aux composants du système (donc aux agents), en plus de leur comportement factuel, des possibilités d'interprétation locale. De cette façon, les agents deviendraient les supports computationnels, à la fois des modèles conceptuels et du domaine, et des mécanismes d'interprétation décrits figure 8. Les macro-connaissances des thématiciens seraient ainsi distribuées parmi les agents de façon similaire à leurs micro-connaissances. Ceci implique, bien entendu, que les agents aient accès à différents niveaux d'abstraction [36], semblables à ceux utilisés par le thématicien, pour, par exemple, automatiquement instancier, en cours de simulation, les «*macro*» agents correspondant à l'apparition d'un phénomène spécifique.

Le travail réalisé par Servat [22] est un bon exemple de ce type d'approche, même s'il n'est pas complètement finalisé, car il a pu montrer l'utilité et la pertinence pour un modélisateur d'un ensemble d'interprétations locales réalisées par les agents de la simulation eux-

mêmes, dans le cas de simulations assez complexes de réseaux hydrologiques. Suivant en cela les conclusions de son article, nous pensons que le développement d'architectures d'agents capables d'une forme, même limitée, d'« introspection collective » sera un des atouts des futurs projets de SOA.

4.2.3. Adaptation au niveau du système

Au fur et à mesure que la SOA aborde des systèmes cibles de plus en plus complexes, [40], il est important, du fait de la puissance de calcul nécessaire, de l'envisager, non plus uniquement « conceptuellement », mais également physiquement distribuée, notamment sur des réseaux de machines. Ce type de distribution, étudiée principalement dans le domaine de la simulation distribuée génère un ensemble assez vaste de nouveaux problèmes (voir, par exemple, [42]) parmi lesquels la nécessité de maintenir un état global cohérent (en réduisant ou en contrôlant les disparités entre les portions du système qui s'exécutent sur différentes machines), la nécessité de répartir au mieux la charge entre les nœuds du réseau, et la nécessité de rendre le système tolérants aux pannes ou aux dysfonctionnements qui peuvent survenir sur ces nœuds.

En raison de leur nature distribuée, les systèmes multi-agents sont déjà étudiés comme technique de régulation au niveau du système, par exemple par l'emploi d'agents mobiles (voir, par exemple, [43]). Ces recherches permettent de rendre la distribution physique adaptative (aux modifications dynamiques du réseau) et transparente pour les utilisateurs. Ajouter aux agents spécifiés dans le modèle opérationnel ces comportements (de clonage, de migration, etc.) permettraient, non seulement de distribuer « automatiquement » des simulations pas forcément conçues dès le départ avec cet objectif, mais également de faire en sorte que cette distribution se réalise de façon adaptée aux particularités mêmes de la simulation exécutée : la répartition des charges pourrait par exemple bénéficier de « connaissances » sur l'état actuel et éventuellement futur du programme et regrouper les agents qui, étant donné l'état courant, sont susceptibles d'interagir dans un état futur. Si nous ajoutons à ces agents les comportements d'introspection collective de la section précédente, les niveaux d'abstraction gérés dans la simulation (groupes, populations, communautés, etc.) pourraient même servir de support à la distribution effective sur le réseau, ce qui simplifierait à la fois la compréhension mais aussi la maintenance des simulations physiquement distribuées ([43] fournit des indications sur les développements actuels dans ce domaine, notamment en référence aux avancées réalisées dans le domaine des jeux en réseau).

4.2.4. Calibration assistée par agents

La dernière, mais pas la moindre, des applications envisageables pour les agents computationnels au sein des SOA est l'assistance «*intelligente*» à la calibration qui, dans bien des cas, est assimilable à de la résolution de contraintes. En effet, en dehors de la calibration «*classique*» de paramètres (qui est un problème présent dans toutes les techniques de simulation), une des tâches les plus difficiles dans les SOA consiste en la génération de populations réalistes d'agents quand les données fournies par le thématique ne concernent que des échantillons de la «*population réelle*». Par exemple, si l'objectif, dans une simulation sociale, est de simuler l'évolution d'une ville de 40.000 personnes, et que les données disponibles consistent en un ensemble de 100 profils distincts (une segmentation), accompagné de mesures comme des moyennes ou des distributions de la population globale par rapport à certains paramètres, la difficulté n'est pas de générer les 40.000 agents correspondants, mais bien de faire en sorte que cette population artificielle satisfasse à la fois les critères locaux et globaux. C'est un problème comparable aux problèmes d'optimisation multi-critères, pour lesquels il est nécessaire d'utiliser des outils avancés, certains de ces outils étant d'ailleurs toujours le sujet de recherches actives en recherche opérationnelle ou en IA.

S'autoriser à fournir aux agents de la simulation une certaine forme d'autonomie peut s'avérer une solution intéressante pour résoudre ce problème. Un exemple en est fourni par le travail de Ben Saïd [12], qui utilise des outils d'évolution génétique au niveau des agents pour générer la population simulée de ses simulations de comportement collectif de consommateurs. La fitness (locale et globale) est calculée en fonction de la conformité de la population aux données globales et de la conformité de chaque agent à un profil existant. Les agents meurent, survivent, se reproduisent, et font converger, de façon itérative, la population qu'ils forment vers une «*population conforme*» à partir de laquelle la simulation peut se dérouler.

De façon plus générale, la SOA recèle de nombreux problèmes qui peuvent être traduits assez facilement sous une forme multi-agent, pour laquelle les recherches effectuées en résolution distribuée de problèmes [4,44] peuvent offrir des techniques robustes et efficaces, mises en application par les agents de la simulation eux-mêmes.

5. Conclusion

Dans cet article, nous avons décrit un cadre méthodologique orienté-modèles pour la conception de simulation orientées agent. Cela nous a

permis de montrer que les projets de SOA existants, bien que se réclamant du domaine des SMA, n'utilisent les agents que dans une acception «faible» qui ne peut s'appliquer qu'aux modèles du domaine et au modèle conceptuel, mais ne franchissent pas le pas qui consisterait à utiliser des agents computationnels dans le modèle opérationnel. Ceci est dû en partie à l'absence d'une sémantique opérationnelle claire dans le domaine des SMA. En dépit de ceci, nous avons identifié un certain nombre d'applications ou d'opérations dans lesquelles l'utilisation d'agents computationnels, tels que ceux étudiés en IAD ou dans les SMA, pourrait se révéler, sinon révolutionnaire, du moins judicieuse. Nos perspectives immédiates sont, d'une part, de développer ce cadre méthodologique de façon à proposer un langage de modélisation et une sémantique dédiée au modèle opérationnel (ceci est l'objet de [21]), et, d'autre part, de mettre en pratique les techniques de conception participative dans deux projets différents (le premier sur la simulation du marché du café à Veracruz, le second sur la simulation de populations de pêcheurs sur le fleuve Mekong, au Laos et au VietNam).

6. References

- [1] Orcutt, G.H.: A new type of socio-economic system. *Review of Economics and Statistics* 39 (1957) 116--123
- [2] Troitzsch, K.G.: Social science simulation - origins, prospects, purposes. *Simulating Social Phenomena* 456 (1997) 41--54
- [3] Harding, A.: Modeling techniques for examining the impact of population ageing on social expenditure. In: *Conference on the Policy implications of the Ageing of Australia's Population*, Melbourne, NATSEM (1999)
- [4] Drogoul, A. When Ants Play Chess (or Can Strategies Emerge from Tactical Behaviors?). in *From reaction to cognition*. C. Castelfranchi & J. P. Müller, eds. Berlin-Heidelberg, Springer-Verlag. 957: 13-27. (1995)
- [5] Jennings N., «On agent-based software engineering», *AI Journal*, 117, 277–296, (2000).
- [6] Vanbergue, D., Treuil J-P., Drogoul A.. Modelling urban phenomena with cellular automata. In *Applications of Simulation to Social Science*. G. Ballot & G. Weisbuch, eds. Hermes, Paris, France. (2000)
- [7] Pietrula, M., Carley, K., Gasser, L.: *Simulating Organizations*. M.I.T. Press (1998)
- [8] M. Resnick, *Turtles, Termites and Traffic Jams*, MIT Press, Cambridge, US (1995).
- [9] Huberman, B., Glance, N.: Evolutionary games and computer simulations. In: *Proceedings of the National Academy of Science USA*. (1993) 7716 -- 7718
- [10] Goldspink, C.: Methodological implications of complex systems approaches to sociality: Simulation as a foundation for knowledge. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 5 (2002) <http://www.soc.surrey.ac.uk/JASSS/5/1/3.html>.
- [11] Gilbert, N.: Computer simulation of social processes. *Social Research Update* 6 (1993)

- [12] Ben Said L., Bouron T., Drogoul A., , Agent-based interaction analysis of consumer behavior, proceedings of the First International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS'02), Bologna, Italy (2002)
- [13] Axtell, R.: Why agents ? on the varied motivations for agent computing in the social sciences. Technical Report 7, Center on Social and Economics Dynamics - The Brookings Institution (2000)
- [14] Drogoul A., Corbara B., Fresneau D., MANTA: New Experimental Results on the Emergence of (Artificial) Ant Societies, in *Artificial Societies: the computer simulation of social life*, Gilbert N. & Conte R. (Eds), UCL Press, London. (1995)
- [15] Schweitzer F., Zimmermann J, *Communication and Self-Organization in Complex Systems: A Basic Approach*, in: *Knowledge, Complexity and Innovation Systems* (Eds. M. M. Fischer, J. Fröhlich), Springer, Berlin (2001)
- [16] Conte, R., Gilbert, N., Simao Sichman, J.: MAS and social simulation: A suitable commitment. *Lecture Notes in Computer Science* 1534 (1998) 1--9
- [17] Lawson, B.G., Park, S.: Asynchronous time evolution in an artificial society mode. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 3 (2000) <http://www.soc.surrey.ac.uk/JASSS/3/1/2.html>.
- [18] Terna, P.: Creating artificial worlds: A note on sugarscape and two comments. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 4(2001) <http://www.soc.surrey.ac.uk/JASSS/4/2/9.html>.
- [19] Epstein, J.M., Axtell, R.L.: *Growing Artificial Societies : Social Science from the Bottom Up*. MIT Press (1996)
- [20] Hannerman, R.: Simulation modeling and theoretical analysis in sociology. *Sociological Perspectives* 38 (1995) 457--462
- [21] Vanbergue D., Meurisse T. Drogoul A., A methodological framework for MABS, in prep., to be submitted to JASSS.
- [22] Servat, D., Perrier E., Treuil J-P. Drogoul A., When Agents Emerge from Agents: Introducing Multi-Scale Viewpoints in Multi-Agent Simulations. *Proceedings of MABS'98*, 183--198, LNAI n° 1534, Springer-Verlag, Berlin. (1998)
- [23] El Hadouaj S., Drogoul A., Espié S., How to Combine Reactivity and Anticipation: the Case of Conflicts Resolution in a Simulated Road Traffic, proceedings of MABS'2000, Springer Verlag LNAI series, Boston, USA. (2000)
- [24] Fishwick, P.: Computer simulation : growth through extension. *IEEE Potential* February/March (1996) 24 to 27
- [25] Fishwick P., *Simulation Model Design and Execution*, Prentice Hall, (1995)
- [26] Doran, J.: From computer simulation to artificial societies. *Transactions of the Society for Computer Simulation International* 14 (1997) Special Issue: Multi-agent systems and Simulation.
- [26] Meurisse, T., Vanbergue, D.: Et maintenant à qui le tour ? aperçu de problématique de conception de simulations multi-agents. In: *Actes du colloque ALCAA : Agents Logiciels, Coopération, Apprentissage & Activité Humaine*. (2001) (in French)
- [27] Gilbert, N., Troitzsch, K.G.: *Simulation for the Social Scientist*. Open University Press (1999)
- [27] Prahladavaradan S., *Modeling Multi-Agent Reactive Systems*, Proceedings of ICLP 2002, LNCS, Springer-Verlag, to appear.
- [28] Axelrod, R.: Advancing the art of simulation in the social sciences. In Conte, R., Hegselmann, R., Terna, P., eds.: *Simulating Social Phenomena*. Springer, Berlin (1997) 21--40

- [28] Servat, D., Drogoul A., Combining amorphous computing and reactive agent based systems: a paradigm for pervasive intelligence?, proceedings of the First International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS'02), Bologna, Italy, (2002).
- [29] Edmonds, B.: The use of models - making MABS more informative. In Moss, S., Davidson, P., eds.: Multi-Agent Based Simulation 2000. Volume 1979 of Lecture Notes in Artificial Intelligence. (2000) 15--32
- [29] Barreteau, O., Bousquet, F., and Attonaty, J.M. Role-playing games for opening the black box of multi-agent systems: method and lessons of its application to Senegal River Valley irrigated systems. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 4(2) (2001)
- [30] Maes, P., "Social Interface Agents: Acquiring Competence by Learning from Users and other Agents." Proceedings of the 1994 AAAI Spring Symposium on Software Agents, AAAI Press, Stanford, (1994).
- [31] Chalupsky, H, Gil, Y., Knoblock, C., Lerman, K., Oh, J., Pynadath, D., Russ, T., Tambe, M. «Electric Elves: Applying Agent Technology to Support Human Organizations» International Conference on Innovative Applications of AI (IAAI'01). (2001).
- [32] Dautenhahn, K. Getting to know each other -- artificial social intelligence for autonomous robots. *Robotics and Autonomous Systems* 16. (1995)
- [33] Gaussier, P., Moga, S., Banquet, J., and Quoy, M. From perception-action loops to imitation processes: A bottom-up approach of learning by imitation. *Applied Artificial Intelligence* 1, 7. (1997)
- [34] Steels, L. and Kaplan, F. AIBO's first words. The social learning of language and meaning. In: Gouzoules, H. (ed) *Evolution of Communication*, vol. 4, nr. 1, Amsterdam: John Benjamins Publishing Company. (2001)
- [35] Hugues, L. Drogoul A., Grounded Representations for a Robot Team. Proceedings of IROS 2000, IEEE/RSJ intern. Conference on Intelligent Robots and Systems, Japan, aug. 2000 (2000)
- [36] Fianyo, E., Treuil, J., Perrier, E., Demazeau, Y.: Multi-agent architecture integrating heterogeneous models of dynamical processes: The representation of time. In Sichman, C., Gilbert, eds.: *Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation*. Volume 1534. Springer-Verlag, Berlin (1998) 226--236
- [37] Hanneman, R. and Patrick, S. ,On the Uses of Computer-Assisted Simulation Modeling in the Social Sciences, *Sociological Research Online*, vol. 2, no. 2, <http://www.socresonline.org.uk/socresonline/2/2/5.html> (1997)
- [38] Buss, S.R., Papadimitriou, C.H., Tsitsiklis, J.N.: on the predictability of coupled automata: an allegory about chaos. *Complex Systems* 5 (1991) 525— 539
- [39] Davidsson, P.: Agent based social simulation : A computer science view. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 5(2002) <http://www.soc.surrey.ac.uk/JASSS/5/1/7.html>.
- [40] Brassel, K., Mohring, M., Schumacher, E., Troitzsch, K.G.: Can agents cover all the world ? *Simulating Social Phenomena* 456 (1997) 55--72
- [41] Axtell, R.: Effects of interaction topology and activation regime in several multi-agent systems. In Moss, S., Davidson, P., eds.: *Multi-Agent Based Simulation 2000*. Volume 1979 of Lecture Notes in Artificial Intelligence. (2000) 33--48
- [42] Glazer D. W., Tropper C., On Process Migration and Load Balancing in Time Warp, *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, (1993) 318— 327

- [43] Michel, F., Bommel P., Ferber, J., Simulation interactive distribuée de SMA par des SMA, proceedings of JFIADSMA 2002 (French workshop on Multi-Agent Systems), Hermès, Paris, France. to appear (2002) (in French)
- [44] Parunak, H.V.D.. Go to the Ant: Engineering Principles from Natural Agent Systems (1/97) Annals of Operations Research 75 69-101. 1997.
- [45] Richardson, K.A.: Methodological implication of complex systems approaches to sociality : Some further remarks. Journal of Artificial Societies and Social Simulation 5 (2002) <http://www.soc.surrey.ac.uk/JASSS/5/2/6.html>.
- [46] Troitzsch, K.G.: Methods of empirical social research. In: SICSS Summer School. (2000)
- [47] Rasmussen, S., Barrett, C.L.: Elements of a theory of simulation. In: European Conference on Artificial Life. (1995) 515--529

Représentations et simulation : de la modélisation à la mise en situation

Jacques Ferber¹

Véronique Guérin²

Résumé

Cet article présente deux aspects de la simulation, la simulation à base de modèle et la mise en situation, à partir d'une conception constructiviste des représentations. On montre que les positions classiques conduisent à des échecs que seule une mise en situation active des acteurs permet de résoudre.

1 Introduction

Le terme de simulation recouvre deux notions : celle de faire semblant et celle d'expérimenter sur un modèle. Il existe évidemment de nombreuses variantes de ces deux acceptions : l'idée de faire semblant peut aussi bien renvoyer à celle de « jeu » (je fais ça pour de faux) qu'à celle de faire croire à autrui une certaine réalité, en trompant l'autre à partir d'apparence. De même, l'expérimentation sur un modèle renvoie aussi bien à la construction de maquettes ou de théâtres, c'est-à-dire d'objets ou de situations concrètes qui servent à étudier la manière dont un système répond à certaines actions qu'à celle d'utilisation d'outils informatiques permettant d'étudier le comportement d'une représentation mathématico-informatique d'un système.

Dans tous les cas, la simulation constitue une mise en relation d'aspects réels et virtuels, la construction d'un rapport avec le monde différent de celui habituel. Il s'agit donc d'une opération cognitive complexe qui place les différents intervenants (expérimentateurs, modélisateurs, acteurs,..) dans une relation consistant à dégager d'une part ce qui est de l'ordre de la réalité, d'autre part ce qui est de l'ordre de la simulation et enfin à évaluer les rapports qui existent entre ces deux ordres.

En outre la simulation n'est généralement pas une opération anodine, un simple jeu qui n'aurait aucune conséquence. Les simulations sont souvent utilisées par la société pour prévoir des événements à partir de conditions initiales connues et pour analyser les conséquences des interventions humaines. Ces constatations sont ensuite utilisées comme aide à la prise de décision, comme outil de gouvernance, comme moyen de déterminer l'ensemble des actions permettant de contrôler un système.

Dans ce qui suit, nous présenterons tout d'abord une introduction à une conception constructiviste des représentations, puis nous appliquerons cette conception à l'étude de deux formes de simulation : la simulation à base de modèle et la « mise en

¹ LIRMM – Université de Montpellier II, 161 rue Ada, 34392 Montpellier cedex 5, ferber@lirmm.fr

² Association Etincelle, <http://asso.etincelle.free.fr>, asso.etincelle@free.fr

situation ». Nous verrons ainsi la simulation à base de modèles, lorsqu'elle est appliquée aux sciences sociales sans précaution, pose un certain nombre de problèmes liés à la difficulté de prendre en compte les représentations des autres acteurs. En revanche, la mise en situation, bien que moins générale dans sa portée, permet de s'affranchir de ces problèmes en faisant participer les différents acteurs et en leur permettant de prendre en compte plus aisément les représentations des autres participants.

2 Représentation et interaction

Dans cette section, nous présentons notre conception de ce que nous appellerons par la suite « représentation » et « réalité ». La vision classique repose sur une conception réaliste et objectiviste du monde. C'est à la fois la conception habituelle que chacun d'entre nous a dans sa vie de tous les jours. C'est aussi la conception que les philosophes avaient avant Kant, et encore de nos jours, il s'agit d'une position encore soutenue, même si cela s'effectue avec plus de finesse, par de nombreux philosophes (cf. Searle [Searle 1995], Barwise & Perry [Barwise & Perry 1983], etc.). Dans la conception réaliste, le monde existe et les représentations que nous avons correspondent à des entités existantes dans le monde, comme l'illustre la figure 1. Dans ce cadre, il est possible de définir une ontologie objective, c'est-à-dire une classification des êtres *tels qu'ils sont effectivement* dans le monde.

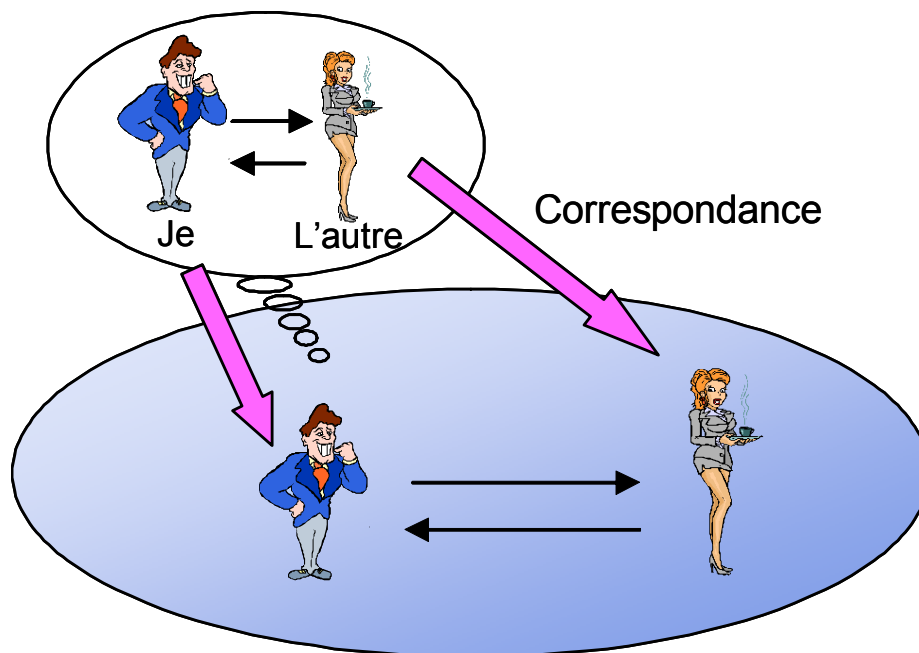


Figure 1: la conception réaliste

A l'inverse, notre position consiste à nier toute réalité objective directe. Cette conception s'appuie sur une position critique (Kant), phénoménologique (Husserl, Merleau-ponty), constructiviste (Piaget, Maturana) et psycho-sociale (Moscovici, Bourdieu) rapport qui existe entre un individu et le monde dans lequel il évolue.

Cette conception s'appuie sur une attitude fondamentale qui consiste à dénier toute possibilité à un sujet (ou à un groupe d'individu) d'atteindre une quelconque réalité objective qui existerait telle quelle, en soi, indistinctement du sujet qui

appréhende cette réalité. Tout sujet, quel qu'il soit (humain, ordinateur, animal), est une partie de cette réalité, inconnaissable dans son être « en soi », mais que l'on peut connaître au travers de représentations construites. Nous appellerons cet univers inconnaissable et inatteignable par notre entendement le Kosmos. Il ne faut pas réduire ce Kosmos à l'univers physique car il comprend aussi tout ce qui ressort de la vie et de nos interactions sociales. C'est ce grand tout indifférencié dont parle les poètes et les religions et dont on ne peut rien dire si ce n'est de manière apophatique (du grec apophasis, négation) en disant tout ce qu'il n'est pas¹.

Tout sujet, dans le simple fait qu'il est, est constitué d'un ensemble de schèmes cognitifs, qui constituent des mises en relations entre des sensations, c'est-à-dire des influences [Ferber & Muller 1996] par le sujet, et des actions, c'est-à-dire des influences produites par lui. Plus le sujet est d'ordre élémentaire (une cellule, une plante, par exemple, ..) plus ces schèmes cognitifs s'expriment comme un simple schéma stimulus-réponse. Plus le sujet est d'ordre complexe (un primate, un être humain), plus ces schèmes cognitifs sont eux-mêmes complexes et comprennent un ensemble de représentations servant de relais entre les sensations et les actions. On utilisera le terme « représentation » dans l'acception qu'elles ont dans les sciences sociales [Jodelet 2000], une forme de connaissance ayant une visée pratique et concourant à la construction d'une réalité ». On distinguera les représentations individuelles, qui se rattachent à un individu, des représentations collectives ou sociales qui se rapportent à un ensemble social ou culturel. Les représentations individuelles relèvent de deux origines. D'une part des *représentations collectives* qui proviennent des groupes dans lesquels l'individu a grandi et vit, et d'autre part des *représentations expérientielles* purement issues de l'expérience de l'individu. Evidemment, la combinaison de ces deux types de représentations est complexe, car les représentations expérientielles sont élaborées au travers du filtre fourni par les représentations collectives.

Le sujet ne peut pas modifier directement les représentations collectives, mais, par sa propre expérience, pas son vécu, par sa trajectoire de vie, il peut modifier ses représentations expérientielles. Nous verrons section 4 quelques techniques de mise en situation permettant de modifier ces représentations expérientielles.

Les schèmes cognitifs, outre les représentations, comprennent tout un ensemble de schèmes relatifs directement aux sensations et à l'action immédiate, que l'on groupera sous le terme « ressenti » (que l'on pourrait aussi appelé « affects », ou sensations individuelle, ou expérientielles) et qui comprend à la fois les schèmes sensori-moteurs, les sensations et les émotions qui se rapportent au vécu immédiat du sujet, avant d'avoir été médiatisées par une représentation, ainsi que l'ensemble des pratiques se référant à ces ressentis. Par exemple la sensation de faim, la douleur immédiate, les sensations proprioceptives que l'on a lorsqu'on pratique un sport, ou tout simplement les sensations internes de son corps qui surgissent lors d'un handicap

¹ On retrouve bien évidemment cette approche dans de nombreuses religions sous le terme de « théologie négative » ou « théologie apophatique » qui consiste à concevoir Dieu (ou le tétragramme, ou Brahma, etc..) par tout ce qu'on ne peut pas dire de lui, en considérant que Dieu se situe à la limite de notre conception. Dans la tradition Chrétienne, le pseudo Denys l'aréopagite, Nicolas de Cluses ou Maître Eckhart notamment, sont quelques uns des auteurs ayant soutenu cette démarche d'accès à la divinité.

moteur soudain (torsion de la cheville par exemple), sont de l'ordre de ce ressenti [Cayrol & de Saint Paul, 1984]. Cependant, bien qu'extrêmement importants pour une compréhension globale de la cognition dans son ensemble, nous ne développerons pas cet aspect dans cet article.

La figure 2 illustre cette conception constructiviste. Ici, les représentations construites par des sujets ne correspondent plus à des réalités, mais sont effectivement des constructions mentales issues d'histoires interactionnelles, c'est-à-dire des suites d'interactions transformées en schèmes cognitifs chez les sujets.

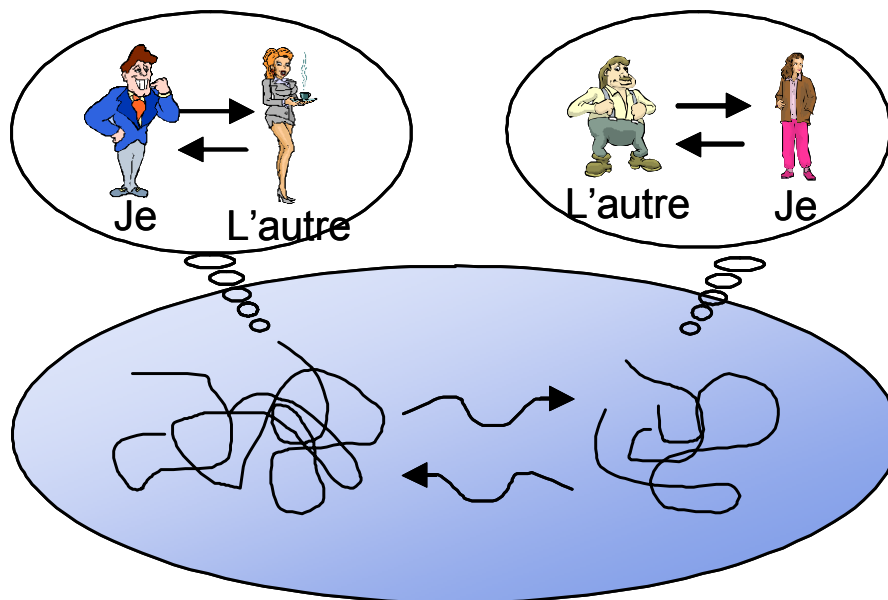


Figure 2: la conception constructiviste

Ces représentations ne sont pas des données passives, de simples « savoirs » au sens des sciences cognitives, mais constituent des systèmes de dispositions durables qui organisent les pratiques ultérieures de l'individu sans que ces représentations soient nécessairement conscientes. Il s'agit donc de la partie représentationnelle de ce que Bourdieu appelle « habitus » [Bourdieu 1980].

Le problème de cette conception, c'est que les représentations ne s'ajustent plus directement au monde « tel qu'il est » comme dans le réalisme, mais sont construites par les sujets. Ne sommes-nous pas alors victimes d'illusions permanentes ? Qu'est ce qui fait que nous puissions dire sans nous tromper « Ceci est un X » et qu'il s'agisse bien d'un X ?

L'idée fondamentale c'est que ces représentations résultent de constructions a priori arbitraires, mais qui sont sélectionnées et stabilisées lors de deux processus homéostatiques de constructions de représentations :

1. Un processus de stabilisation environnementale, liée à notre à notre rapport au monde, et
2. Un processus de stabilisation sociale, liée à l'ensemble des interactions que nous entretenons en tant qu'être humain, avec d'autres êtres humains.

Ces deux représentations sont liées, car en tant qu'être humain nous sommes une partie du Kosmos, nous nous percevons mutuellement et nous agissons physiquement les uns sur les autres. D'autre part la stabilisation environnementale est aussi liée aux interactions sociales et à l'ensemble des représentations sociales ainsi construites qui

nous font voir les choses au travers d'un filtre, qui est d'ailleurs aussi une matrice constructive, liée à un certain environnement socio-culturel. Pour prendre un exemple très classique, en tant qu'être humain (c'est-à-dire en tant qu'organisme issu d'une histoire interactionnelle évolutive très longue), les sensations que nous pouvons avoir de la neige sont pratiquement les mêmes que les Inuit, mais nos perceptions sont différentes car elles sont liées à une pratique beaucoup plus approfondie de la neige chez les Inuits. Cette pratique, au travers d'une évolution culturelle a entraîné une différenciation plus fine des différents types de neige et à un vocabulaire considérablement plus riche pour tout ce qui se rapporte à la neige¹.

Le processus de stabilisation environnementale a particulièrement bien été étudié par J. Piaget dans l'évolution des capacités cognitives de l'enfant [Piaget 1975]. C'est ainsi, par l'activité pratique, et à partir de cette *praxis*, que le sujet construit ses représentations, lesquelles ne se présentent pas sous une forme désordonnée, mais comme une structure des représentations, coordonnées par les processus d'accommodation et d'assimilation.

Mais ce processus de stabilisation environnementale ne permettrait pas à lui seul de construire des représentations, s'il n'y avait la faculté de langage et d'interaction entre êtres de la même espèce et de la même culture. C'est cette capacité du langage, située au cœur de notre action (comme le dit H. Maturana, « We are living systems that exist in language » [Maturana 1998]), de décrire, de juger, de constituer et de transmettre des différences, de catégoriser ce qui nous entoure.

Nous n'entrerons pas plus ici dans ces problèmes qui sont évidemment au cœur de la construction des représentations individuelles et sociales pour nous consacrer à l'étude des conséquences de cette conception.

Il s'agit simplement d'avoir à l'esprit que ces représentations ne « correspondent » pas à des entités réelles, mais qu'elles décrivent des aspects du Kosmos (parties, processus) définis essentiellement par leur opérationnalisation (l'ensemble des opérations que l'on peut effectuer dessus) et que ces représentations sont nécessairement « pertinentes » par rapport à cette opérationnalisation. Par exemple, une table n'est pas une table en soi : elle est définie par sa structure (un plateau sur des pieds) et par son usage (servir à poser quelque chose dessus), mais surtout elle est construite, elle émerge de l'ensemble des pratiques (opérations, usages, discours, publicités, définitions commerciales, etc.) que nous pouvons avoir de ces parties du Kosmos que nous appelons tables². Pour preuve le fait que l'on puisse utiliser pratiquement n'importe quoi « pour faire une table » : morceau de bois, pierre, etc., et qu'en même temps elle se distingue socialement d'autres objets similaires (chaises, plateaux, bureaux, etc.) par l'ensemble des interactions que nous entretenons avec.

Le rapport qu'une représentation entretient avec ce qu'elle représente n'est donc pas un rapport de correspondance, mais un rapport *d'adéquation*. Par adéquation, on

¹ Le fait culturel est tel que nous sommes obligé de parler de cette attitude culturelle en utilisant nos mots et non ceux des Inuits, qui verraient chez nous une certaine pauvreté à confondre ce qui leur apparaît comme totalement différent.

² On pourrait montrer qu'il en est de même de tous les objets dits « naturels » qui sont finalement construits et déterminés par l'ensemble des pratiques et des discours que l'on peut avoir dessus. Par exemple, qu'est-ce qu'un bois ou une forêt ?

entend le fait que la représentation est suffisante pour nous permettre d'avoir une relation pratique (immédiate ou différée) avec quelque chose et d'entrer en relation avec d'autres personnes à propos de cette chose. Une représentation adéquate n'est pas une correspondance « vraie » au sens ordinaire du terme, mais elle est simplement pertinente par rapport au point de vue choisi, par rapport au niveau d'abstraction, de généralisation et de granularité désiré. De ce fait une représentation est plus ou moins adéquate par rapport à une visée et à une pratique. L'adéquation ne peut donc pas être mesurée « objectivement ». Cette mesure dépend elle aussi d'un point de vue. Point de vue du sujet, lorsque la représentation est directement liée à un de ses objectifs, point de vue d'un enseignant par rapport à un apprenant, point de vue d'un observateur extérieur, etc.

Comme nous l'avons vu dans l'introduction, la simulation renvoie à deux acceptions : celle de manipulation de modèle et celle de « faire semblant ». Nous analyserons maintenant, à l'aide de ces outils conceptuels que nous venons de présenter brièvement, ces deux types de simulation. Dans un premier temps, nous essayerons de dégager un cadre conceptuel pour la modélisation, et dans le second, nous nous consacrerons à la notion de *mise en situation*, c'est-à-dire de simulation dans laquelle des personnes jouent des situations.

3 La modélisation

Avec les outils conceptuels que nous venons de présenter brièvement, il est maintenant possible de parler de modélisation et de simulation.

3.1 Modélisation sans prise de décision

Une situation de modélisation met en scène un modélisateur, une partie du Kosmos et le modèle, représentation plus ou moins formalisée de cette partie. La conception classique de la simulation est illustrée figure 3.

Dans cette situation, le modélisateur a conscience de construire un modèle d'une partie de la réalité qui la représente, la décrit, l'explique et éventuellement prédit son évolution future. Mais s'il a conscience de la construction du modèle, il prend cette partie de réalité comme si elle était donnée, et lui se vit en dehors de cette réalité, comme s'il se situait dans un autre espace.

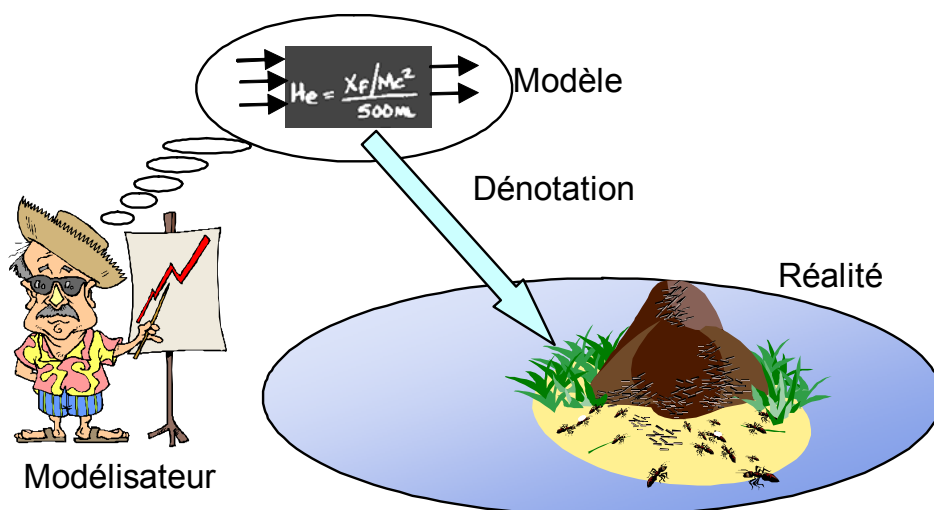


Figure 3. La situation de modélisation classique

En fait, dans une conception constructiviste, la réalité n'est pas donnée comme objet *déjà là* dont la structure serait indépendante des acteurs/observateurs. Dans ce cas, ce qu'on appelle « réalité » est déjà un construit, une partie en fait du modèle, comme l'illustre la figure 4.

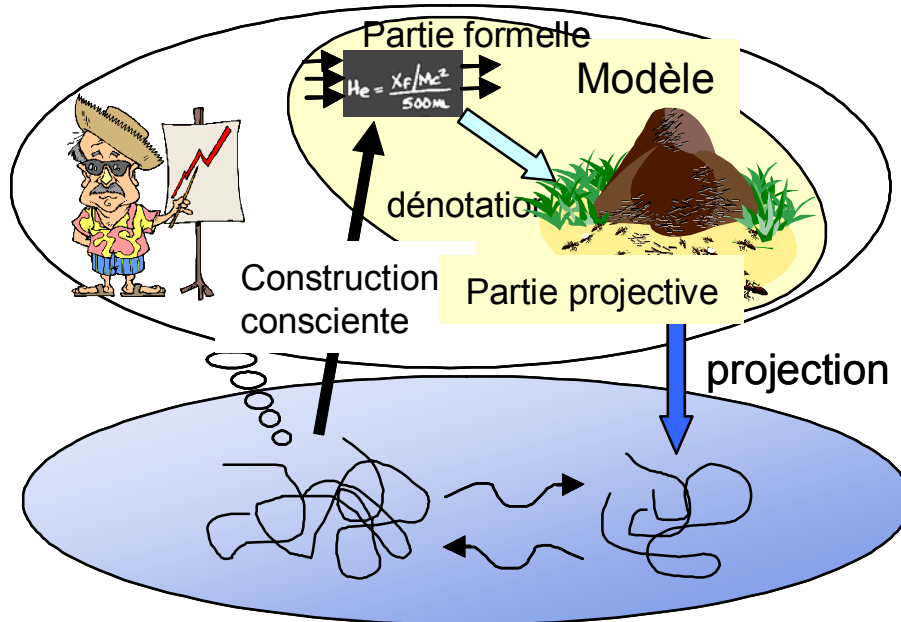


Figure 4. La situation de modélisation dans une perspective constructiviste

Le modélisateur interagit avec d'autres parties du Kosmos et projette des représentations sur cette partie. Puis il construit ce qu'il appelle modèle à partir de cette représentation. Nous appellerons *partie projective* d'un modèle cet aspect de la représentation fondée sur une conceptualisation généralement implicite de l'observateur et qu'il projette automatiquement sur cette partie du Kosmos qu'il étudie. Nous appellerons *partie formelle* l'aspect de la représentation qui a été mis en forme et généralement explicité au travers d'inscriptions de manière à pouvoir être transmis dans un groupe social donné. A priori, cette distinction pourrait sembler très artificielle si la modélisation n'est pas utilisée dans le cadre d'une application, avec un souci d'utilisation du modèle afin d'expliquer et/ou prévoir des phénomènes. Le cas particulièrement intéressant est celui des sciences sociales dans lesquelles les comportements des individus sont modélisés.

Dans le domaine des sciences sociales, le processus de modélisation n'est pas neutre car il porte sur des personnes et donc sur des individus doués de capacités, eux aussi, de représentation.

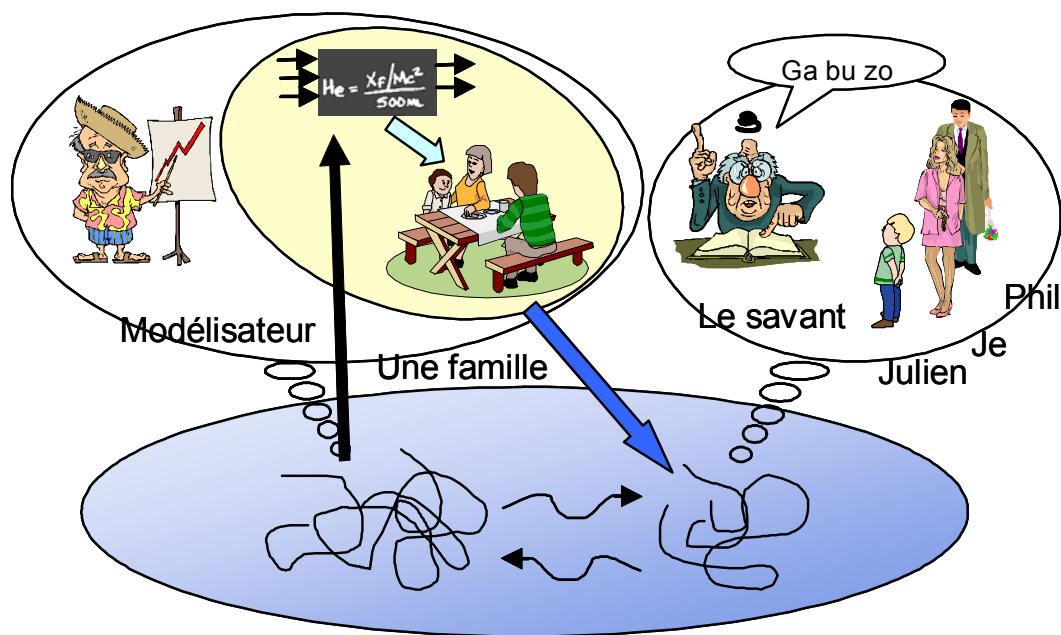


Figure 5. La modélisation en sciences sociales d'un point de vue constructiviste

Dans ce cas, comme l'illustre la figure 5, le modélisateur, tout en croyant s'abstraire du monde par le biais de son modèle, fait partie du Kosmos et est donc soumis, lui aussi, aux représentations des autres personnes et en particulier de ceux qu'ils modélisent. De ce fait, le chercheur fait partie de la boucle sociale et ne peut se distinguer. La tentation est grande, et cette tentation est valable pour chacun de nous, de penser qu'il est possible de s'abstraire du contexte et d'évaluer quelque chose indépendamment de nous.

3.2 Modélisation avec prise de décision

Dans une situation de modélisation, le modélisateur n'est pas seul. Des modélisateurs provenant de différentes disciplines peuvent être présents ainsi que des personnes utilisant la modélisation pour prendre des décisions. Traitons ce cas des modélisations avec prises de décisions.

Dans le cadre classique, le modélisateur comme le décideur pensent être à l'extérieur de ce qu'ils modélisent comme l'illustre la figure 6. On suppose en premier lieu que le modèle construit par le modélisateur correspond bien à la manière dont le décideur se représente le monde, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de problèmes de communication entre le modélisateur et le décideur.

Si le modèle est bien fait et bien calibré, si les variables sont pertinentes, les objectifs « réalistes », on suppose qu'il est possible de prendre des décisions et d'agir dans le monde de manière à ce que les objectifs du décideur soient atteints. C'est peut être le cas (et encore) dans le domaine des sciences de l'ingénieur, où le modèle est relativement adéquat du fait que la partie du Kosmos que l'on représente ne réagit pas aux décisions prises par l'intermédiaire de représentations propres.

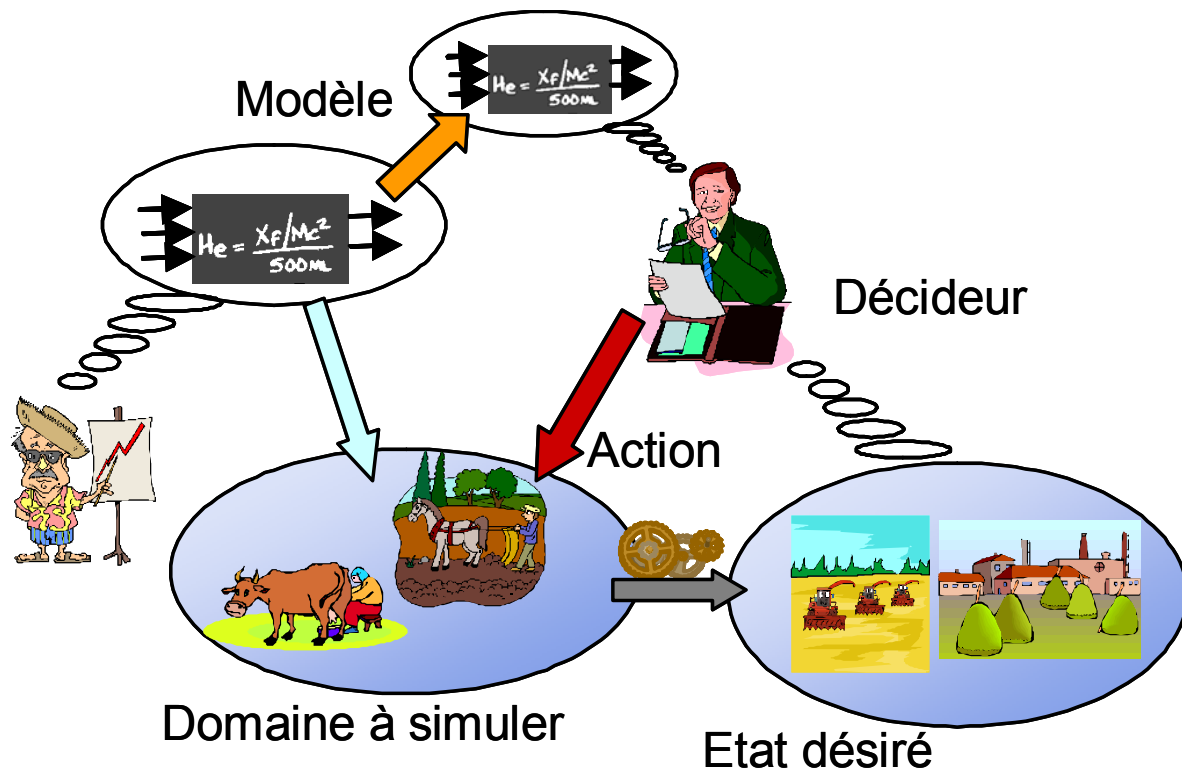


Figure 6: la modélisation pour la prise de décision dans l'optique réaliste

Mais par contre, lorsque le système est trop complexe pour être abordé à partir d'un seul point de vue, où lorsque le modèle porte sur des êtres doués de représentations, il n'en va pas de même. L'impact des transferts de représentations du modélisateur au décideur d'une part, comme la manière de ressentir les décisions par ceux qui sont soumis à ces décisions d'autre part, conduisent évidemment à des situations non prévues par le modélisateur et non désirées par le décideur. Car les représentations des personnes modélisées vont évidemment rejaiillir sur l'évolution du Kosmos, sur l'état du monde..

La figure 7 illustre ce point. Le décideur pense que ses actions vont avoir un impact favorable sur le développement, alors que les personnes modélisées considèrent que ces décisions entraîneront la désertification de leur région. Dans ce cas, la modélisation, suivie de décision, peut conduire à des situations singulièrement pires que s'il n'y avait pas eu de modélisation.

Alors comment résoudre ce problème ? Comment arriver à prendre des décisions mettant en œuvre des êtres humains dont les représentations seront nécessairement différentes de celles du décideur ? Comment se sortir du piège éternel des projections ? Une solution réside paradoxalement dans la simulation. Mais dans une autre forme de simulation dans laquelle les acteurs vont se mettre en situation, vont agir en prenant le rôle des autres acteurs en tentant de mieux comprendre le point de vue d'autrui. La simulation devient ainsi une piste intéressante pour appréhender le phénomène de la projection et le mécanisme représentationnel. Elle ne se situe plus dans le cadre d'un modèle formel mais dans une mise en situation des personnes permettant à chacun d'incarner successivement plusieurs points de vue.

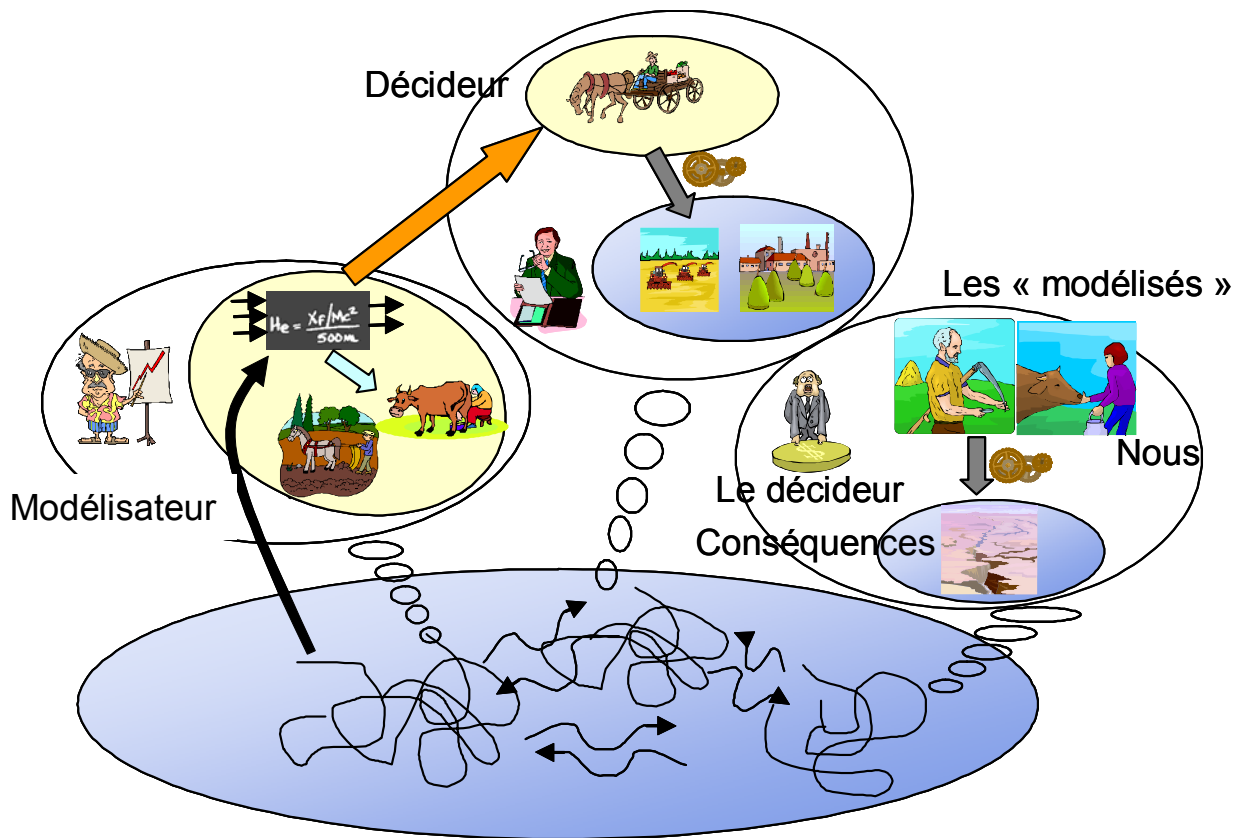


Figure 7. La modélisation suivie de décision

4 La mise en situation

La mise en situation, que l'on appelle aussi « jeu de rôle » est une simulation participative. Il ne s'agit plus de construire un modèle mais de décrire une situation « virtuelle » extraite de la vie réelle. Même si cette situation est nécessairement réductrice ou simplificatrice, elle permet, à partir de la description de faits et des comportements, de tester de nouvelles attitudes et leur impact sur soi et autrui sans pour autant subir les conséquences qu'elles auraient dans la vie « réelle ».

La mise en situation peut prendre de nombreuses formes et être utilisée dans différents contextes où il est question de travailler sur les représentations des uns et des autres. Par exemple, elle peut, dans un groupe thérapeutique, permettre à une personne de rejouer une scène de sa vie qui lui a laissé un goût d'échec et d'insatisfaction. Le sujet décrit la scène : le cadre, les personnes présentes, les événements ayant précédé cette scène, les paroles qui ont été dites, les mouvements, les expressions... Ainsi, chaque personne du groupe peut se représenter la scène, visualiser les événements et proposer d'incarner un des personnages. Cette reconstitution permet de retracer de la façon la plus fidèle possible les événements vus de l'extérieur. Le travail de mise en situation va consister, pour le sujet, à modifier ses représentations initiales grâce à une meilleure compréhension de ce qui a pu motiver les actes de chacun.

Ce travail s'effectue au travers de deux processus représentationnels : l'introspection et la décentration [Guérin 2001].

4.1 L'introspection

L'introspection est la capacité à prendre conscience des pensées et émotions qui motivent nos actes. Dans certaines situations stressantes ou conflictuelles, l'articulation entre émotions, pensées et actes est mise à mal et l'on se retrouve à agir comme « hors de soi ». En rejouant situation qu'elle a vécue, la personne peut reprendre contact avec ce qui s'est passé à l'intérieur d'elle-même : « Comment je me suis senti ? Qu'est-ce que j'ai pensé ? Qu'est-ce que j'ai cru que l'autre allait faire ou dire ? ».

La mise en situation facilite ce travail d'introspection car la personne est, de fait, intégrée à la situation qu'elle essaie d'appréhender. Elle est empêchée de parler de la situation ou de l'autre, de s'extraire du système et d'analyser la situation de l'extérieur. Ce processus d'introspection consiste donc à rendre conscientes des zones de flou ou des dissonances entre émotions, pensées et actes, de manière à adapter ses représentations et les rendre cohérentes et adéquates.

En parallèle avec ce processus d'introspection, est utilisé un processus analogue et symétrique qui permet d'aborder l'autre de l'intérieur, la décentration.

4.2 La décentration

La décentration est la capacité à ressentir ce que l'autre ressent, à comprendre le point de vue de l'autre sans pour autant l'adopter.

Il s'agit tout simplement du principe de réflexion mis en œuvre. Le sujet se représente l'autre avec ses ressentis et ses représentations. Afin que ces représentations soient les plus adéquates possibles, le sujet se « met dans la peau du personnage », en percevant le monde à travers son point de vue, et en ressentant la situation à partir de sa position, comme l'illustre la figure 8. Si l'on compare cette figure avec celle de la figure 1, on constate que le sujet a modifié sa représentation en passant « au niveau méta », c'est-à-dire en prenant en compte la position de l'autre et en construisant une représentation attribuée, celle qu'il imagine que possède l'autre. Evidemment, cette représentation attribuée n'est pas la représentation effective que possède l'autre, car il est absolument impossible d'avoir accès à la représentation de l'autre, mais elle s'en rapproche¹.

Ce processus de décentration permet donc de modifier le regard que le sujet porte sur l'autre « vu de l'extérieur » (c'est-à-dire ne prenant en compte que les aspects comportementaux) et de modifier ainsi la représentation qu'il s'en est fait.

¹ Il n'est pas possible de définir une distance entre deux représentations, car ces représentations appartiennent à deux sujets distincts. Mais il est possible de définir une distance entre deux représentations de représentations. Si le sujet A décrit sa représentation R_A , il fournit une représentation $D(R_A)$, où D est le « dire de A » tel qu'il est exprimé. Il est alors possible de comparer les dires de A et de B concernant leurs représentations et ainsi de comparer $D(R_A)$ et $D(R_B)$ en calculant $\text{Dist}(D(R_A), D(R_B))$. On pourra alors dire que la représentation de A se rapproche de B si cette distance diminue. Mais évidemment, cette distance n'est pas « objective » au sens classique.

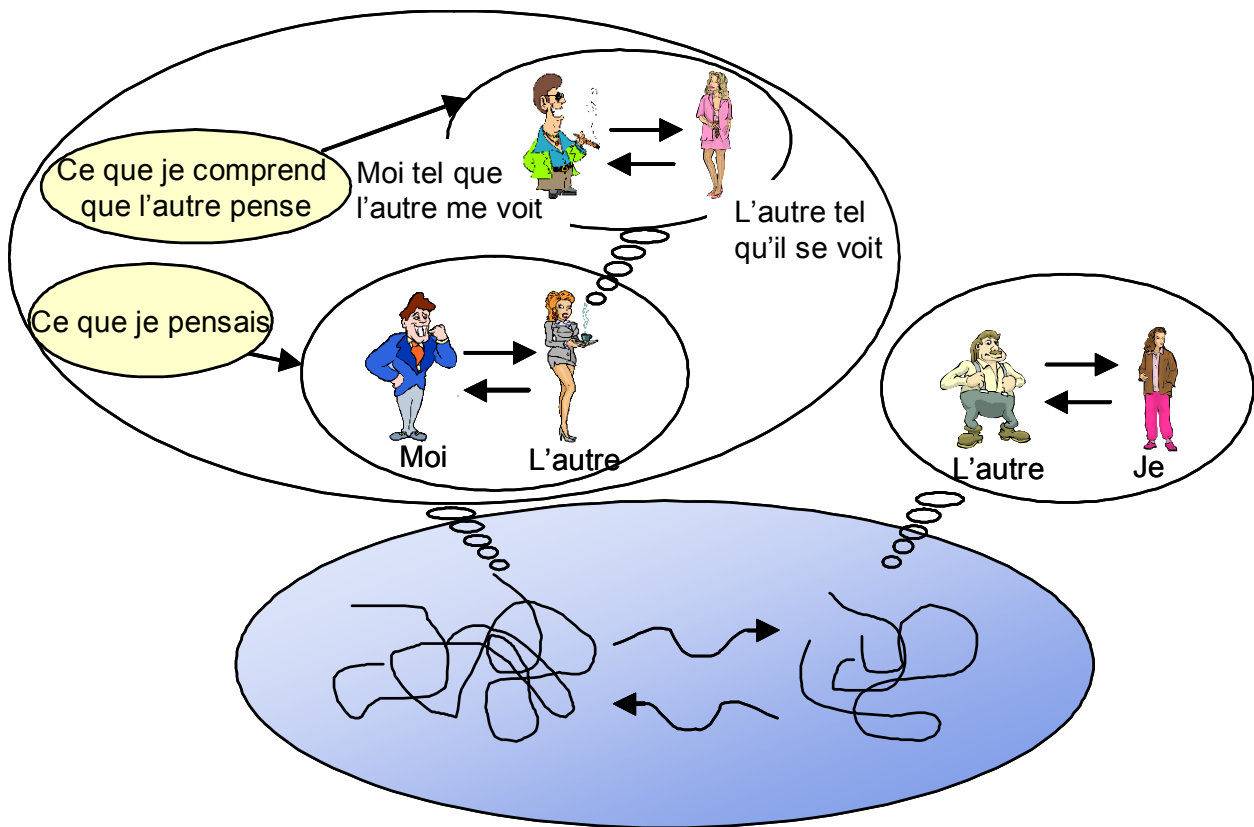


Figure 8. Le processus de décentration

La décentration est importante car les représentations sont, comme nous l'avons dit plus haut, l'une des sources fondamentales de l'action. C'est la représentation que le sujet possède de l'autre, consciente ou inconsciente qui va motiver son attitude à l'égard de ce dernier. Si cette représentation est adéquate, elle peut aider le sujet à agir de façon adaptée dans une situation particulière. En revanche, lorsqu'elle est obsolète, incorrecte, elle parasite la relation que le sujet entretient avec autrui et génère fréquemment tensions, rupture de communication et risque donc d'accentuer l'inadéquation des représentations des deux bords.

La décentration est donc un processus essentiel pour faire évoluer ses représentations sur autrui et adopter son comportement en conséquence. C'est ce travail de décentration qui est au cœur de la technique théâtrale spécifique proposée par A. Boal, le théâtre-forum.

4.3 Le théâtre-forum

Le *théâtre-forum*, conçu au Brésil au début des années 1970 par Augusto Boal [Boal 1980] est une forme spécifique de mise en situation dans laquelle le spectateur peut venir remplacer un personnage et modifier ainsi l'histoire. Utilisé dans un cadre politique spécifique, il avait pour objectif d'aider des individus démunis et exploités à trouver des formes de lutte face à un système injuste. Il est actuellement utilisé comme une invitation à modifier ses représentations et à agir en cohérence avec ses valeurs : quelle que soit sa place, chacun a une part de responsabilité et une marge de manœuvre pour transformer les situations qu'il vit. Le théâtre-forum présente les caractéristiques suivantes :

- l'histoire présentée est inspirée de faits réels,
- l'histoire se termine mal : coups, insultes, blessures, échec, rupture, exclusion, haine...
- les spectateurs sont invités à venir remplacer un des personnages à un moment de l'histoire qui leur paraît opportun pour changer le cours des choses et tenter ainsi une fin plus heureuse.

Il a pour objectif de poser des questions et d'interpeller chacun comme une personne participant par ses actes, ses paroles, ses silences à la façon dont se déroulent les événements [Guerre 1998]. Pour les joueurs comme les spectateurs, et par l'ensemble des aspects de cette mise en situation, le théâtre-forum développe les capacités suivantes :

- Celui qui joue son propre rôle, par l'introspection, peut mieux comprendre les motivations qui motivent ses actes,
- Celui qui joue le rôle d'un autre, par la décentration, peut mieux comprendre les motivations qui motivent les actes d'autrui,
- Ceux qui observent (les spectateurs, mais aussi ceux qui regardent d'autres joueurs jouer leur rôle), peuvent faire évoluer leurs représentations de par l'éventail des attitudes proposées.

Loin de vouloir faire émerger « La » solution qui serait le résultat d'une analyse objective de la situation, le théâtre-forum interdit au spectateur de rester à l'extérieur. En lui proposant d'entrer dans le jeu et donc de faire partie de la situation, il lui permet, par l'introspection et la décentration, de confronter ses représentations à celles des autres. De ce dialogue, parfois crispé, émergent progressivement une ouverture et une qualité relationnelle, signes indicateurs de l'évolution des représentations.

5 Conclusion

Dans cet article, après avoir esquissé une introduction à une conception constructiviste des représentations, nous avons abordé le problème des formes de simulation. Nous avons vu que les approches classiques de la modélisation fondées sur une vision purement réaliste présentent de nombreuses difficultés en ne prenant pas en compte les représentations des différents acteurs. En revanche, les approches constructivistes qui ne postulent pas l'existence d'une réalité connaissable en soi, permettent d'appréhender des situations dans lesquelles les points de vue sont mieux pris en compte. Pourtant, de prime abord, il peut sembler qu'il suffirait d'analyser une situation pour construire des représentations adéquates et ensuite faire partager ses représentations aux acteurs d'une situation. Malheureusement, cette possibilité entraîne souvent de graves défauts car on tombe généralement dans l'erreur du réalisme en croyant que l'on peut se placer « en dehors » ou « au dessus » du reste du monde. Il s'agit d'un problème très connu en anthropologie que l'on regroupe sous le terme général d'ethnocentrisme et qui consiste à analyser une culture à partir de ses propres représentations

Au contraire, lors d'une mise en situation, lorsque les participants jouent leur rôle ou celui d'un autre, ils ne peuvent pas « sortir du cadre » comme le ferait un modélisateur ou un décideur. Ils prennent ainsi conscience que leurs représentations

ne sont pas la réalité, et se sentent concernés par autrui. Ce type d'approche pose d'ailleurs la limite de la modélisation et montre que sans participation active des différents acteurs, le risque de s'égarer est plus grand.

Note : si l'article est accepté, nous nous proposons d'animer une séance de mise en situation afin que les participants de Rochebrune puissent se rendre compte par eux-mêmes des aspects de la mise en situation.

6 Bibliographie

- [Barwise, Perry 1983] **Barwise J., Perry J.** *Situations and attitudes*, MIT Press 1983.
- [Boal 1980] **Boal A.**, *Le théâtre de l'opprimé*, Eds Maspéro, 1980.
- [Bourdieu 1980] **Bourdieu P.**, *Le sens pratique*, Les éditions de Minuit, 1980.
- [Cayrol, de Saint Paul 1984] **Cayrol A., de Saint Paul J.**, *Derrière la magie, la PNL*, Eds Interéditions, 1984.
- [Ferber, Muller 1996] **Ferber J., Muller J.-P.** *Influences and Reactions: a Model of Situated Multiagent Systems*. Proc. of ICMAS'96 (International Conference on Multi-Agent Systems), AAAI Press, 1996.
- [Guérin 2001] **Guérin V.** *A quoi sert l'autorité ?*, Eds. Chroniques sociales, 2001.
- [Guerre 1998] **Guerre Y.** *Le théâtre-forum, pour une pédagogie de la citoyenneté*, Eds l'harmattan, 1998.
- [Jodelet 2000] **Jodelet D.** et al. *Les représentations sociales*, Puf, 2000.
- [Maturana 1998] **Matunara H.**, « the Ontology of Observing », Texts in Cybernetics, American Society For Cybernetics Conference, Felton, CA, 18-23 October, 1988
- [Piaget 1975] **Piaget J.** *L'équilibration des structures cognitives*, PUF, 1975.
- [Searle 1995] **Searle, J. R.** *The Construction of Social Reality*, Free Press, 1995.

Exploration numérique des propriétés d'un modèle : analyse par simulation de la réponse aux paramètres

Vincent Ginot

INRA, Unité de Biométrie, Domaine St. Paul, 84814 Avignon cedex 9, France
Ginot@avignon.inra.fr

Résumé

Ce papier rappelle que des techniques simples et éprouvées comme l'analyse de la variance ou le calcul empirique des fonctions de sensibilités permettent déjà d'explorer par simulation la réponse d'un modèle à ses paramètres. Cette analyse peut bousculer les idées reçues, il serait dommage de s'en passer.

I- Contexte

La modélisation en écologie s'attaque à des processus spatio-temporels toujours plus complexes, pour lesquels l'étude analytique des solutions est de plus en plus délicate, sinon impossible à mettre en œuvre. Parallèlement, de nouvelles techniques se développent, comme les simulations individu-centrées et multi-agents, pour lesquelles la notion même de formalisme se heurte à la complexité des interactions entre entités modélisées. Analyses de stabilité, analyses de sensibilité, identifiabilité des paramètres, comparaisons modèle / données, voire même objectifs de la modélisation et prise en compte de points de vue différents sur une même réalité complexe, c'est pratiquement toute la méthodologie de construction, de compréhension et d'utilisation de ces modèles qu'il faut repenser, et cela probablement sur la seule base disponible : la répétition des simulations et leur traitement statistique. L'unité de biométrie INRA d'Avignon a initié une réflexion sur ce thème. Sur la base d'un modèle simple, nous avons commencé à explorer ce que des techniques classiques comme les plans d'expérience ou le calcul empirique des fonctions de sensibilité peuvent apporter à la compréhension d'un modèle individu-centré. Ce travail a débouché sur la création d'un module de dépouillement de simulations, initié sous 'R' par Nicolas Labat (DESS statistiques/informatique de Vannes) et appelé à progressivement se développer.

II- Matériel et méthodes

2.1- Méthodologie

Pour analyser la réponse d'un modèle par rapport à ses paramètres, nous suggérons de procéder en 3 étapes.

- 1- Une étape "mono-facteur", paramètre, par paramètre, qui permet de se faire une idée de la forme générale de la réponse du modèle, ainsi que de sa variance. Cette étape consiste à faire varier la valeur de chaque paramètre dans une plage assez large, avec un nombre suffisant de point et en répliquant les simulations, les autres paramètres étant fixés à leur valeur nominale, i.e. des valeurs jugées réalistes dans le contexte de la simulation. On obtient donc un graphe de réponse par paramètre. Cette étape permet en outre de préparer le terrain pour la suite : choix d'une transformation éventuelle de la variable réponse pour la linéariser et homogénéiser sa variance, et choix du nombre et de la valeur des niveaux à introduire, pour chaque paramètre, dans l'analyse de variance.
- 2- Une étape d'analyse de variance, qui permet de tester la contribution de chaque paramètre à la variabilité des réponses du modèle, de hiérarchiser globalement ces effets, et de déceler s'il existe des interactions entre paramètres. Cette étape donne une idée "globale" de la réponse du modèle aux paramètres. En effet, on choisira de tester des valeurs de paramètres (appelés niveaux dans une analyse de variance, les paramètres devenant les facteurs) qui correspondent par exemple à toute la gamme biologiquement possible pour le paramètre.
- 3- Une étape d'analyse de sensibilité au sens classique, où la dérivée de la réponse du modèle à chaque paramètre, pour un pas de temps donné, est estimée par régression linéaire au voisinage d'un point de fonctionnement du modèle. Cette étape est très complémentaire de la première dans le sens où elle est locale. Car on étudie l'effet d'une même perturbation (en général, arbitrairement $\pm 10\%$, en vérifiant que la réponse reste linéaire dans cette zone) autour de la valeur nominale de chaque paramètre, les autres paramètres étant fixés ou bien eux-mêmes variables autour de leur valeur nominale. En répétant cette estimation dans le temps, on obtient pour chaque paramètre la courbe de l'évolution de la sensibilité de la réponse. Ces courbes sont très utiles pour affiner les plans d'expériences en situation réelle, et l'étude de leurs corrélations permet de juger d'une éventuelle surparamétrisation du modèle. Inconvénient, contrairement à l'étape précédente, seuls les paramètres à valeurs continues peuvent être testés.

2.2- Le modèle

Nous allons montrer l'intérêt de ce type de démarche sur un modèle très simple qui décrit la phase de démarrage d'une population de gambusies, un petit poisson utilisé comme auxiliaire de lutte contre le moustique, élevés en bacs extérieurs de quelques m³. Ce modèle décrit la croissance en taille des poissons, leur survie et la reproduction. Cette simplicité reste réaliste dans la mesure où on ne s'intéresse qu'à la phase de démarrage de la population, avant que la densité de poissons ne devienne trop importante. Car le but de ce modèle est d'aider à dépouiller des expérimentations réelles destinées à tester l'influence des pesticides sur le développement de la population de ces poissons. Dans la pratique, quelques jeunes femelles sont introduites en mai, et l'expérience est arrêtée à la fin de l'été. L'objet est de regarder si la distribution en taille de la population finale, ou toute autre composante mesurable de la population, est affectée par le pesticide.

Croissance. On utilise la très classique fonction de Von Bertalanffy, où le taux de croissance décroît linéairement en fonction de la taille.

$$d(\text{taille})/dt = a (1 - \text{taille} / K)$$

C'est donc une fonction concave monotone sans point d'inflexion, qui possède deux paramètres, le taux de croissance initial (a) et la taille maximale atteinte (K).

Survie. Elle sera supposée constante, ce qui est une très grossière approximation, mais différenciée selon le stade de développement du poisson. Nous aurons donc deux mortalités, la mortalité juvénile et la mortalité adulte, séparées par la taille de métamorphose qui marque le passage du juvénile indifférencié à un individu adulte, mâle ou femelle.

Reproduction. La reproduction est conditionnée par la durée de la gestation, qui représente un premier paramètre. Le nombre d'alevins est une fonction linéaire seuillée de la taille, avec deux paramètres : le seuil de fécondité (taille minimale de la femelle autorisant une production d'alevin), et la pente que nous appellerons fécondité. Ces poissons sont ovovivipares, c'est-à-dire que le développement embryonnaire se fait dans le corps de la femelle, et qu'elle met bas de petits alevins de 7 à 8 mm déjà bien armés pour la vie.

Si nous excluons la taille initiale des alevins, ce modèle possède donc 8 paramètres, dont nous donnons les fourchettes biologiquement acceptables, les valeurs de référence prise pour l'analyse mono-facteur et l'analyse de sensibilité, et les niveaux utilisés pour l'analyse de variance :

Table 1. Valeurs des paramètres : fourchettes considérées biologiquement acceptables, valeurs de référence du modèles et niveaux retenus pour l'analyse de variance.

<i>Paramètre</i>	<i>unité</i>	<i>Fourchette</i>	<i>référence</i>	<i>niveaux ANOVA</i>
Taux de croissance	mois ⁻¹	0.15 – 0.4	0.25	0.3 ; 0.25 ; 0.2 ; 0.15
Taille maximale	mm	50 – 70	60	50 ; 70
Seuil de métamorphose	mm	12 – 18	15	13 ; 17
Survie adulte	mois ⁻¹	60 – 100 %	90	60 ; 90
Survie juvénile	mois ⁻¹	20 – 40 %	30	20 ; 40
Durée de gestation	Jour	25 – 35	30	25 ; 35
Seuil de fécondité	mm	22 – 24	24	22 ; 26
Fécondité (pente)	alevins.mm ⁻¹	1.5 – 4	2	1.5 ; 3

Conditions initiales. En conditions réelles, de 2 à 10 femelles (selon leur taille) sont introduites, et l'on cherche à obtenir des reproductions aussi synchrones que possible pour bien observer la date d'apparition des différentes cohortes d'alevins. Pour l'analyse de sensibilité, on cherchera au contraire à lisser au maximum les reproductions pour éviter d'ajouter inutilement des non linéarités à la réponse. Nous introduisons donc 10 jeunes femelles, dont la taille est fixée à 24 mm, et la maturité régulièrement étalée entre 0 et 30 jours, avec un délai d'acclimatation de 15 jours (i.e. la durée de gestation des femelles initiales est portée à 45 jours).

Composantes stochastiques. Outre la mortalité individuelle (à chaque pas de temps chaque individu meurt ou non en fonction de sa probabilité de survie), des composantes stochastiques supposées reflétées la variabilité biologique des poissons sont apportées. La taille initiale des alevins est tirée entre 7 et 8 mm à la naissance, et les poissons se voient dotés d'une variation de la durée de la gestation de plus ou moins 3 jours autour de la valeur nominale et d'une variabilité de $\pm 10\%$ autour de la valeur nominale des deux paramètres de croissance (sans corrélations entre ces différents paramètres).

Résolution numérique. Le modèle est résolu de manière discrète, avec un pas de temps de 1 jour, en suivant le devenir de chaque individu au cours du temps (modèle individu centré implémenté sur la plate-forme Mobidyc, Ginot *et al.*, 2002). On vérifie qu'à ce pas de temps la discrétisation de la fonction de croissance (qui s'apparente donc à une méthode d'intégration numérique de type Euler) n'entraîne pas de biais notable. C'est un point important à vérifier en l'absence d'une théorie de la discrétisation qui permettrait de "corriger" la valeur des paramètres, ainsi que l'expression des fonctions pour leur assurer la même forme générale, en fonction du pas de temps. Du fait de l'absence d'interaction

entre poissons, le choix du mode d'appel des différents individus au cours d'un pas de temps, imposé par l'approche individu-centrée, n'a aucune influence.

Dans ces conditions, après la phase d'acclimation de 15 jours sans reproductions, le modèle montre fort logiquement une belle croissance exponentielle de la population pour atteindre 600 à 800 individus en fin de simulation.

III- Résultats :

3.1- Analyse mono-facteur

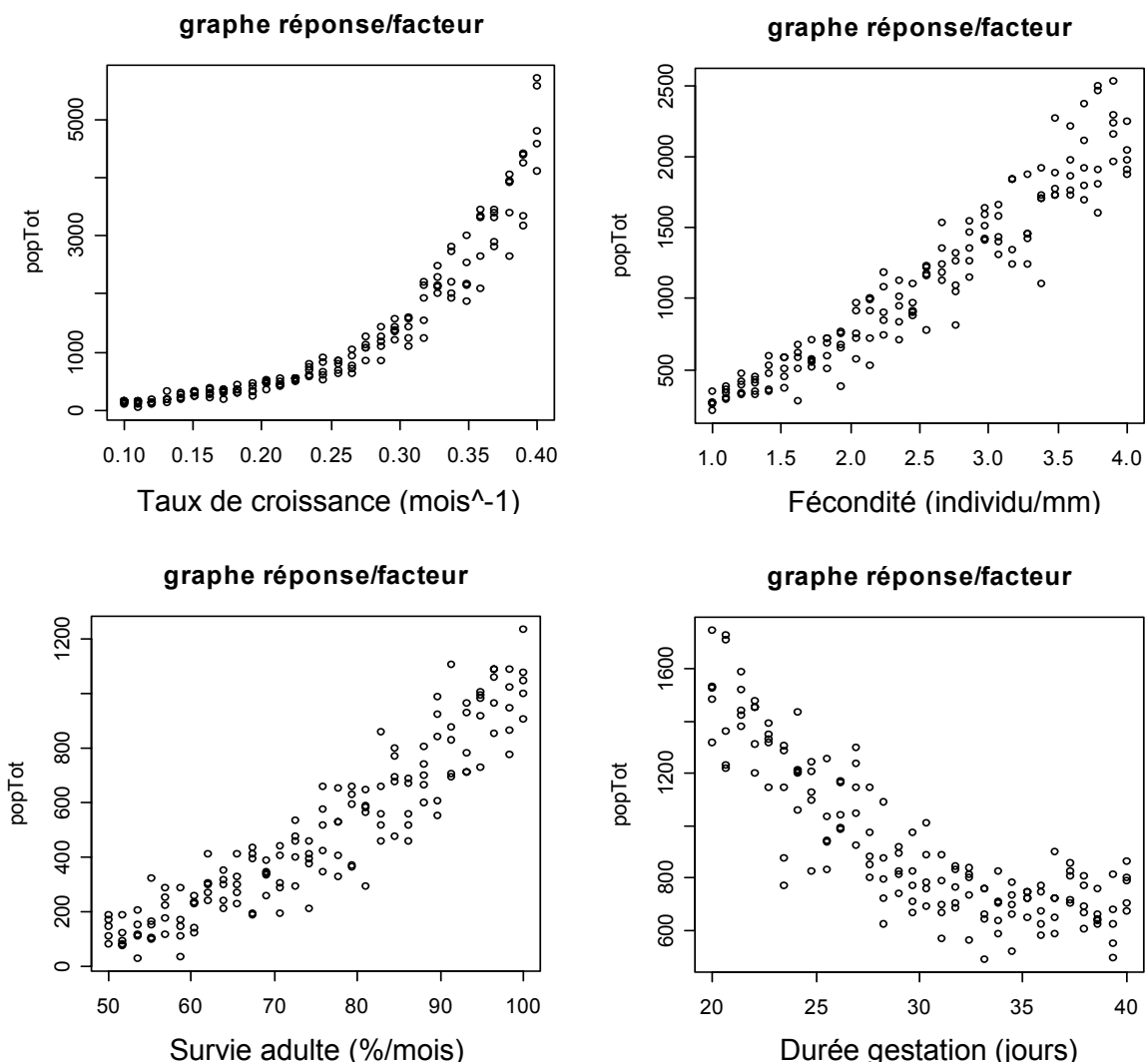


Figure 1 : Réponse du modèle (effectif total en fin de simulation) à quatre paramètres : taux de croissance, fécondité, survie adulte et durée moyenne de gestation.

Cette étape permet de constater que la forme de la réponse est assez variable, tant par sa forme, plus ou moins linéaire, que par l'évolution de la variance, plus ou moins constante. Attention cependant à l'effet loupe, la gamme de variation est sensiblement différente d'un paramètre à l'autre. On notera que la décision de transformer ou non la variable de sortie pour linéariser la réponse et homogénéiser la variance n'est pas totalement évidente. Sur un modèle de croissance d'effectif comme celui-ci, la transformation logarithmique s'impose presque toujours car moyennes et écarts-types sont en général proportionnels. Et c'est ce que confirmeraient des graphes en échelle log, non figurés. Nous ferons une recherche systématique de transformation dans l'analyse suivante.

3.2- Analyse de variance

Il est fortement conseillé d'utiliser un plan d'expérience avec répétitions (10 répétitions constitue une bonne base). Ceci permet de tester dans de bonnes conditions l'hypothèse d'homogénéité de la variance qui, plus que celle de normalité des résidus¹, conditionne la qualité des résultats obtenus. Sur notre exemple, cette hypothèse est largement rejetée et une méthode de recherche de la meilleure transformation possible (Box Cox, 1962 présentée par Perry 1987) débouche sans grande surprise sur une transformation proche de la transformation logarithmique.

Cette étape franchie, il est temps de préciser le modèle linéaire sur lequel nous allons baser notre analyse. Sans entrer dans les détails, indiquons simplement que l'analyse de variance va nous permettre de tester si un facteur (i.e. un paramètre) entraîne ou non une réponse du modèle et de chiffrer cette réponse en termes de carrés des écarts par rapport à la moyenne totale. Si on se restreint à deux niveaux pour un paramètre, on pourra simplement tester si le passage de la valeur basse à la valeur haute change ou non la réponse du modèle. C'est souvent suffisant pour notre objectif, surtout si la réponse du modèle est sensiblement linéaire par rapport à ce paramètre, notamment après transformation. Si on utilise trois niveaux, on pourra séparer un effet linéaire (la réponse du modèle au troisième niveau est une simple extension de la droite qui passe par les deux premiers niveaux) d'un éventuel effet quadratique (la réponse au troisième niveau n'est pas alignée sur celle des niveaux précédents, et doit être ajustée à l'aide d'un polynôme d'ordre 2). Si on utilise quatre niveaux, on pourra tester un éventuel effet cubique. Et ainsi de suite. L'analyse de variance permet également de tester les interactions, c'est-à-dire de tester si la réponse du modèle pour des valeurs conjointes de deux paramètres (ou plus) est différente

¹ Le résidu se définit comme l'écart entre la valeur prédite et la valeur observée, donc ici entre le modèle d'analyse de variance et le modèle initial.

de la simple somme des réponses de chaque paramètre pris individuellement (effet moyen de A et B par rapport à la moyenne, égal ou non à effet moyen de A + effet moyen de B). On peut donc penser qu'il est préférable de prendre beaucoup de niveaux et un ordre d'interaction élevé pour ne pas passer à côté de quelque chose d'intéressant. Dans la pratique ce n'est pas si simple. Car l'analyse de variance ne se dépouille bien que si les plans d'expériences, c'est-à-dire le choix des combinaisons de valeurs à tester, sont équilibrés (on dit aussi orthogonaux). Or ces plans sont difficiles à produire dès que le nombre de facteurs augmente. Par simplicité, nous utilisons des plans complets à 2 ou 4 niveaux avec répétitions, qui ont toutes les bonnes propriétés (Kleijnen, 1987) mais font très vite exploser le nombre de simulations. Car un plan complet de n facteurs à p niveaux demande p^n simulations, à multiplier par le nombre de réplicats. A titre d'exemple, le plan d'expérience que nous dépouillons comprend déjà $512 * 10 = 5\ 120$ simulations. Par ailleurs un ordre d'interaction élevé est souvent difficile à dépouiller et à interpréter biologiquement. Dans la pratique, on restreint donc le nombre de niveaux et l'ordre des interactions. Une manière simple de contrôler que l'ordre d'interaction retenu est suffisant est de contrôler la variance expliquée par le modèle. Dans notre cas elle est de 94% avec une interaction d'ordre 2 (i.e. paramètres pris 2 à 2), et un ordre supérieur ne fait rien gagner. Cela signifie qu'un modèle linéaire assez simple (qui compte tenu du nombre de facteurs, niveaux et interactions comprend tout de même 53 paramètres) suffit à prédire la variabilité des 512 combinaisons testées, et qu'il fournit donc une bonne base pour discuter de l'importance relative des paramètres et de leurs interactions principales.

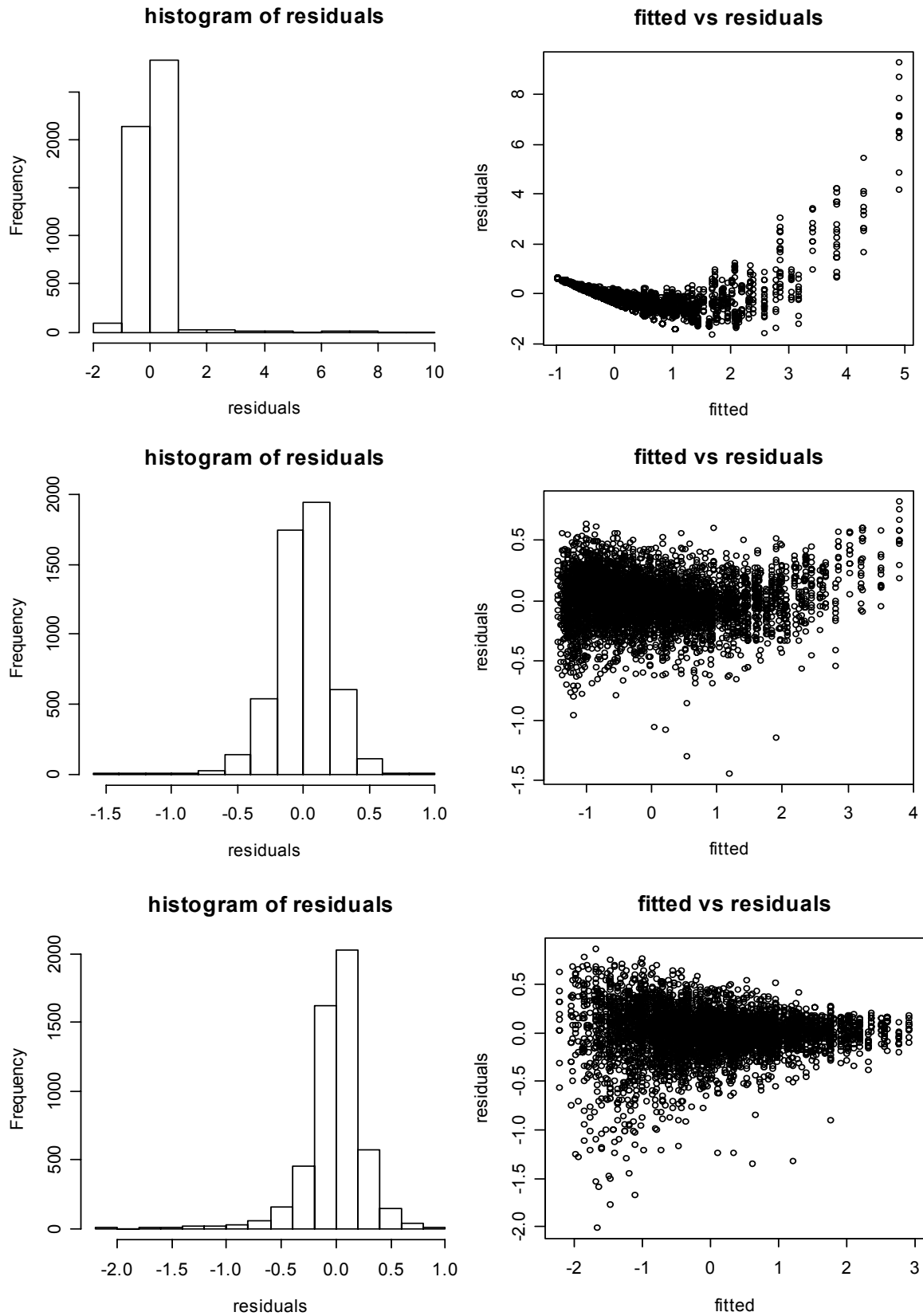


Figure 2 : ANOVA. Contrôle a posteriori des hypothèses de normalité des résidus (à gauche) et d'homogénéité de la variance (ou homocédasticité, à droite), ainsi que de nullité de l'espérance des résidus. Les données sont

centrées réduites. En haut, anova sur données brutes, au milieu sur la transformation qui homogénéise au mieux les variances $((y^{0.2}-1)/0.2)$, en bas sur le log des effectifs. Aucune n'est parfaitement satisfaisante, mais la transformation logarithmique sera retenue car c'est la seule pour laquelle l'espérance des résidus reste bien toujours nulle.

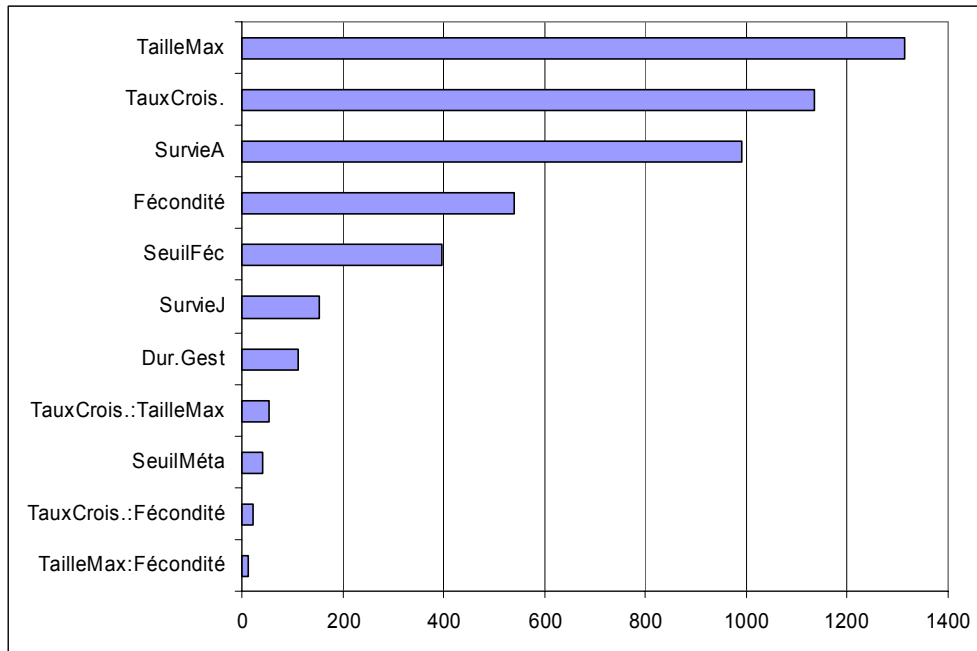


Figure 3 : ANOVA : résultats de l'analyse. Somme des carrés des écarts à la moyenne expliqués par chaque paramètre et par les principales interactions.

L'analyse donne pour chaque "effet" de chaque paramètre (effet simple, supposé linéaire, si deux niveaux, effets linéaires, quadratiques et cubiques si quatre niveaux), et pour chaque interaction entre effets, la somme des carrés des écarts expliqués et le niveau de signification de cet effet. Nous ne chercherons pas ici à détailler toutes les composantes significatives, d'autant que le non respect de l'hypothèse d'homocédasticité nous en empêcherait, mais simplement les plus influentes en essayant de les hiérarchiser. Dans le graphe ci-dessus, le terme Taux Croiss représente l'effet linéaire de ce paramètre. Nous avons pourtant utilisé quatre niveaux pour ce dernier, mais du fait de la transformation des réponses seul l'effet linéaire est significatif, ce qui permet de vérifier *a posteriori* l'efficacité de cette transformation. La figure 3 montre que les paramètres de croissance arrivent en tête, suivis de la survie adulte. Viennent ensuite les paramètres de fécondité puis la survie juvénile. La seule interaction un peu sensible se produit entre les paramètres de croissance : le surplus de poissons, par rapport à la moyenne générale, d'un bac qui contient des poissons qui à la fois poussent vite et deviennent grands sera légèrement supérieur (car interaction positive, non figurée) à la somme des surplus, toujours par rapport à

la moyenne générale, de deux bacs, le premier contenant des poissons poussant vite mais ne devenant pas particulièrement grands, et le deuxième contenant des poissons qui deviennent grands mais ne poussant pas particulièrement vite. Mais attention, pour des effectifs en échelle logarithmique. Car transformer la variable influe évidemment non seulement sur la forme de la réponse au paramètre, mais également sur les interactions. Et on voit là encore tout l'intérêt de la transformation choisie. Le modèle ayant une croissance exponentielle, les écarts d'effectifs entre bassins plus ou moins performants croissent également de manière exponentielle et conduiraient à de nombreuses interactions difficiles à interpréter. Par ailleurs, on notera que contrairement à ce que nous pensions le modèle n'est pas particulièrement sensible à la survie juvénile. C'est heureux car ce paramètre est toujours délicat à estimer. A l'inverse, on ne s'attendait pas, *a priori*, à ce que la taille maximale ait tant d'effet. Mais l'intérêt de ce type d'analyse est justement là : bousculer un peu nos *a priori*, même sur des modèles extrêmement simples comme celui-ci !

3.3- Analyses de sensibilité locales :

La troisième étape consiste à calculer les coefficients de sensibilités, c'est-à-dire la dérivée de la réponse du modèle (ou ici son logarithme) à chaque paramètre pour un pas de temps donné. On l'estime par régression linéaire au voisinage d'un point de fonctionnement du modèle, ici les valeurs nominales données table 1. La procédure est donc strictement identique à celle de l'étape 1, mais la plage de variation est réduite à une petite variation autour de la valeur nominale ($\pm 15\%$ sur notre exemple). Une variante, bien utile lorsque le nombre de paramètres et le nombre de pas de temps sont importants, est de faire varier simultanément tous les paramètres. Car il suffit alors d'une seule série de simulations (400 pour cet exemple), pour estimer les coefficients de sensibilités de tous les paramètres pour un pas de temps donné. Ce faisant, on obtient des coefficients moyens qui peuvent émettre quelque peu la vraie valeur mais qui sont amplement suffisants pour notre analyse. Le principal inconvénient de cette variante vient de ce qu'il est plus difficile d'estimer la significativité de ces coefficients, par test de non nullité de la pente ou par test de permutation mimant l'effet de paramètres fictifs sans effet (Klepper et al., 1994), du fait du bruit apporté par les autres paramètres.

Intéressons nous d'abord au dernier pas de temps afin de le comparer à l'anova. Il nous faut pour cela normaliser chaque coefficient en le multipliant par la plage de variation qui a servi à le calculer. Nous obtenons alors des valeurs comparables, qui représentent la variation de la sortie, en log des effectifs, pour une même petite variation relative de chaque paramètre.

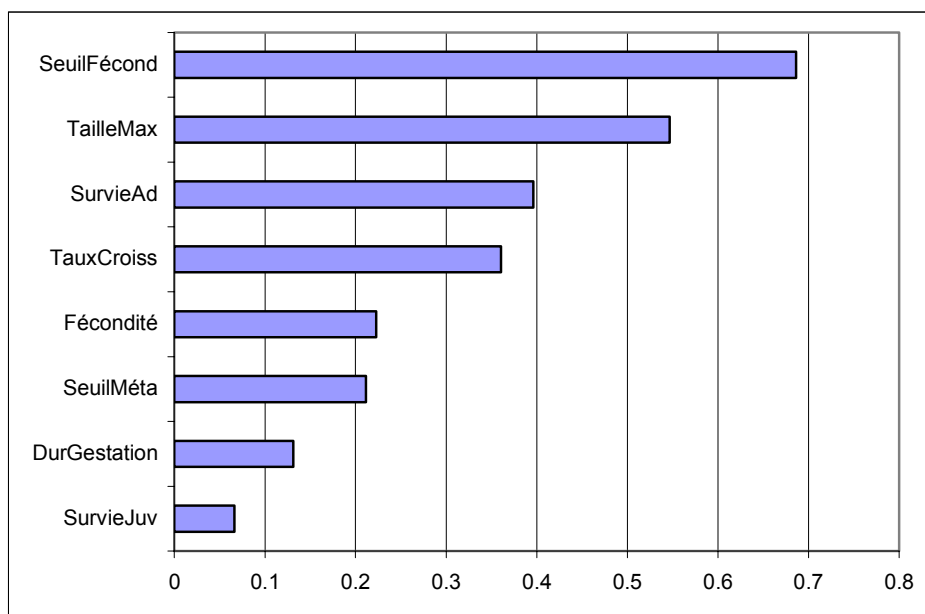


Figure 4. Coefficients de sensibilités normalisés, au dernier pas de temps.

Le graphe des résultats est effectivement très différent de celui donné par l'anova (figure 4). Et surprise encore, le paramètre "localement" le plus influent est le très peu attendu seuil de fécondité alors que le taux de croissance perd du terrain, dépassé par la survie des adultes. Ces paramètres sont donc ceux qui ont le plus d'importance relative sur le modèle. Cela signifie qu'en retour il est important de connaître leur valeur avec précision si on veut réduire la dispersion des valeurs prédites par le modèle, même si, comme c'est le cas avec le seuil de fécondité, la faible fourchette biologiquement acceptable pour le paramètre ne le distinguait pas particulièrement lors de l'anova.

Mais attention, en général cette hiérarchie des sensibilités évolue sensiblement dans le temps. Ces évolutions des coefficients de sensibilité dans le temps, appelées en général fonctions de sensibilité, permettent de localiser les moments où le modèle est sensible aux différents paramètres. Une retombée est d'aider l'expérimentateur à décider des dates où il doit faire porter son effort d'échantillonnage s'il souhaite récolter des données susceptibles de l'aider à définir la valeur de certains paramètres (étape de calage du modèle). On constate sur l'échantillon de la figure 5 que les fonctions de sensibilités ont des valeurs absolues globalement croissantes, et que la plupart ont des sensibilités nulles sur les premiers pas de temps, ce qui est logique puisque les reproductions n'ont pas encore démarré (phase d'acclimatation).

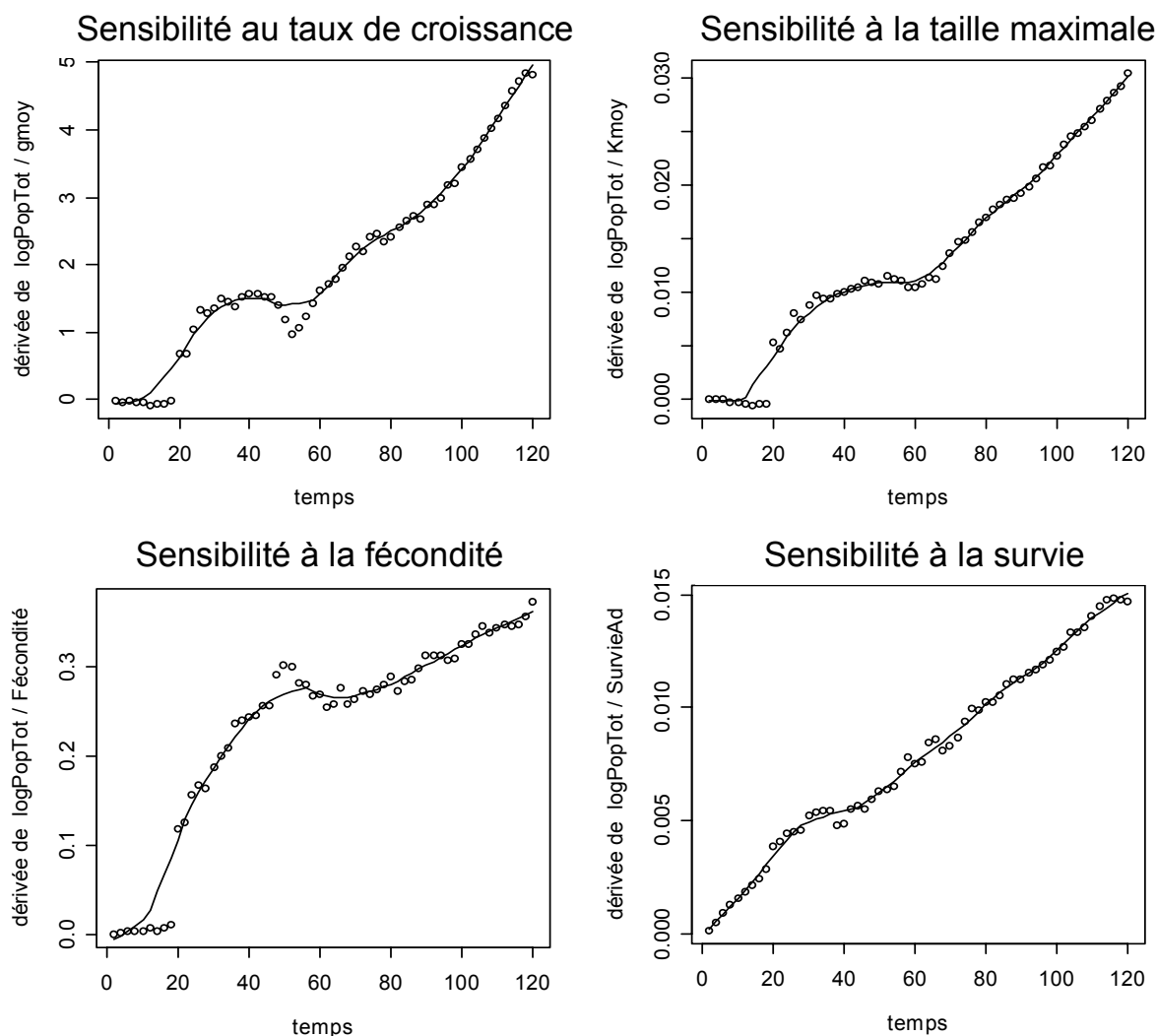


Figure 5. Sensibilités locales : évolution de la sensibilité du modèle à quatre paramètres au cours du temps

L'expérimentateur devra donc plutôt échantillonner en fin d'expérience. Mais comme il souhaite en général identifier plusieurs paramètres à la fois la procédure est un peu plus délicate. Concrètement, pour pouvoir identifier un lot de paramètres, il faut que l'action d'un paramètre sur la réponse soit bien sûr non nulle, mais aussi qu'elle ne puisse pas être reproduite par une combinaison linéaire des autres paramètres. Ce qui se traduit par une matrice des fonctions de sensibilité de plein rang. C'est la condition dite d'identifiabilité *a priori*. Si elle n'est pas respectée le modèle sera déclaré surparamétré (ce qui en soit n'a rien de déshonorant).

Dans la pratique, on observe les fonctions et on dresse la table des corrélations entre fonctions pour débusquer les paramètres trop corrélés. La table 2 nous montre que sur notre exemple, il sera impossible de séparer le taux de croissance de la taille maximale, les deux fonctions de sensibilité étant effectivement

beaucoup trop proches. Il faudra également vraisemblablement fixer la survie adulte et/ou le seuil de métamorphose avant de lancer une éventuelle procédure d'identification des paramètres. Sur les 8 paramètres de départ, il serait donc peut-être possible d'en identifier 5 ou 6 *a priori*, c'est-à-dire en échantillonnant parfaitement notre variable de sortie. Un tel chiffre de 5 ou 6 paramètres identifiables sur une variable de sortie semble effectivement un maximum, relevé en particulier par Beck et Arnold (1977). Il ne doit pas surprendre. En terme d'information, cela signifie qu'une variable d'état donnée, ici l'évolution de l'effectif de la population, ne contient qu'une information limitée sur le système qui régit son évolution, et qu'elle ne permet d'obtenir qu'une connaissance limitée sur le système, en particulier en terme de nombre de paramètres que l'on peut espérer déterminer. Et ici la forte composante stochastique du modèle, allié à sa non-continuité (les alevins arrivent dans la réalité par paquets, comme des "Dirac", car on cherche à garder les reproductions synchrones), ne simplifieront pas la procédure. D'autant qu'une méthode de mesure fiable et non perturbatrice des effectifs de poissons au cours du temps reste à inventer...

Tableau 2. Sensibilités locales : corrélations entre fonctions de sensibilités.

	TauxCroi	TMax	SMéta	SurvAd	SurvJuv	DurGest	SFéc	Féc
TauxCroiss	1.00							
TailleMax	0.99	1.00						
SeuilMéta	-0.96	-0.96	1.00					
SurvieAd	0.97	0.98	-0.96	1.00				
SurvieJuv	0.87	0.89	-0.91	0.88	1.00			
DurGestat	-0.67	-0.75	0.78	-0.78	-0.81	1.00		
SeuilFécond	-0.90	-0.91	0.88	-0.87	-0.77	0.62	1.00	
Fécondité	0.86	0.90	-0.90	0.88	0.87	-0.78	-0.93	1.00

IV- Conclusion

Ce travail souhaitait montrer comment la combinaison de techniques simples et éprouvées peut se révéler utile pour explorer le comportement d'un modèle pour lequel on ne dispose pas de solution analytique. Et qu'il serait donc dommage de s'en passer, comme c'est trop souvent le cas. L'analyse de sensibilité d'un modèle non linéaire dans un espace des paramètres supérieur à deux, reste cependant une entreprise délicate et toujours partielle. En particulier l'analyse de variance est trop "globale" (que se passe t'il entre les niveaux choisis ?), et l'analyse de sensibilité trop "locale" (que se passe t'il au voisinage d'un autre point de fonctionnement du modèle ?). C'est un dilemme bien connu et même si rapprocher ces deux méthodes peut paraître y répondre, leurs limitations respectives restent irréductibles.

De même, les outils présentés se limitent à l'analyse de sorties scalaires continues, ce qui peut obliger le modélisateur à simplifier outrageusement ses sorties. Dans notre cas par exemple, ce n'est pas l'effectif final de la population qui nous intéresserait le plus, mais sa structure en taille, et la déformation de cette structure sous l'effet des paramètres (et dans la réalité sous l'effet des pesticides). Etendre ces analyses de sensibilités à des sorties vectorielles (histogrammes de tailles ou autres), voire matricielles (structuration dans l'espace) serait donc un pas important. Mais c'est sans doute une autre histoire...

Soulignons pour finir que ce type d'analyse ne se restreint pas aux seuls modèles individus-centrés. Toute "machine à produire des sorties numériques", pilotée par des paramètres à valeurs discrètes (sauf pour les sensibilités locales) ou continues peut s'y prêter. Donc dans la pratique tout modèle dont la formulation devient trop complexe pour qu'une étude analytique de ses propriétés soit possible.

Bibliographie

Banks J., 1998. Handbook of Simulation. Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice. Wiley & Sons, NY, 849 pp.

Beck J.V., Arnold K.J., 1977. Parameter estimation in engineering and science. Wiley & Sons, NY, 501 pp.

Box G.E.P., Cox D.R., 1964. An analysis of transformations (with discussion). *J. R. Stat. Soc. Serie B*, 26 (2) 211-252.

Ginot V., Le Page Ch., Souissi S., 2002. A multi-agents architecture to enhance end-user individual based modelling. *Ecol. Model.*, 157 (2002) 23-41.

Kleijnen J.P.C, 1987. Statistical tools for simulation practitioners. Marcel Dekker, inc., NY, 429 pp.

Klepper O., Van der Tol M.W., Scholten H., Herman P.M., 1994. Smoes – A simulation model for the oosterschelde ecosystem. 1. Description and uncertainty analysis. *Hydrobiologia* 283, 437-451.

Perry J.N., 1987. Iterative improvement of a power transformation to stabilise variance. *Appl. Stat.*, 36 (1) 15-21.

Peut-on simuler un système quantique?

Jerzy Karczmarczuk

Dept. d'Informatique, Université de Caen, France
(<mailto:karczma@info.unicaen.fr>)

Résumé

Nous présentons une méthodologie de construction informatique d'entités qui correspondent aux états et aux opérateurs de la mécanique quantique. La construction est « abstraite » au sens discuté ultérieurement, mais réalisable dans un langage populaire de programmation fonctionnelle, Haskell. Nous suggérons que la méthodologie fonctionnelle adoptée correspond mieux que d'autres à la notion de *simulation*, où les entités réalisées par l'ordinateur reflètent notre état de connaissances des systèmes simulés, en gardant une certaine indépendance par rapport au contexte d'observation. L'article peut être lu par toute personne possédant un *minimum* de connaissances sur la mécanique quantique

1 Introduction : est-ce une bonne question?

Les premiers ordinateurs des années 40, avaient pour but de trouver la solution des problèmes quantiques, tel la fission nucléaire. Un des objectifs primaires de l'élaboration des architectures parallèles était leur application à la physique moderne. Le statut épistémologique de

la théorie quantique « standard », acceptée par le milieu scientifique, s'est stabilisé dans les années 40 – 50. Les techniques calculatoires évoluent toujours, mais depuis 20 ans aucune révolution, ni technique ni conceptuelle n'a vu le jour. L'expérience acquise est donc bonne, et relativement stable. On sait comment résoudre l'équation de Schrödinger, on sait comment chercher les valeurs propres des opérateurs « observables », la chimie et l'optique quantique sont devenues des domaines industriels.

Cependant, si le mot « simulation » ne se réduit pas aux calculs des orbitales, etc., mais signifie une tentative de mettre dans l'ordinateur une « chose » dont les *propriétés* possèdent une représentation structurelle ou relationnelle réalisable dans la pratique informatique, la situation devient beaucoup moins claire. Une particule *classique* dont l'abstraction est spécifiée par sa position et sa vitesse *est* une structure de données contenant six *champs* numériques. La simulation du mouvement est le processus itératif qui modifie ces propriétés.

Or, nous ne savons toujours pas ce qu'est une « chose quantique »... La fonction d'onde de Schrödinger n'est pas une particule, même si cette fonction peut être localisée dans l'espace. Les attributs (potentiellement) observables comme la position, le spin ou l'impulsion, sont des valeurs propres des opérateurs dans l'espace de Hilbert des états quantiques, mais les états sont indépendants de ces opérateurs, tandis que dans le monde classique les observables *définissent* l'état. L'ontologie quantique reste mystérieuse, même si nous pouvons calculer et mesurer les probabilités déduites des dites fonctions d'onde.

Avec l'outil informatique nous pouvons nous contenter avec des fonctions d'onde et des « observables »¹ (matrices, opérateurs différentiels, etc.) sans nous poser de questions philosophiques. Cependant, le problème est devenu important d'un autre point de vue : la

1. Dans le jargon quantique *une* observable est un opérateur représentant une quantité physique observable, comme l'énergie etc.

possibilité de construire un *ordinateur quantique*, une structure possédant une base discrète d'états binaires (les « qubits »), qui permet d'effectuer des *calculs*, réalisés comme dans le cas classique : un état initial est transformé, et en mesurant les propriétés (les configurations) de l'état final on obtient la réponse à un problème.

Ce domaine subit actuellement une véritable explosion. Le nombre d'articles et de réalisations logicielles consacrés à la simulation des « circuits quantiques », ainsi que des langages de programmation conçus pour modéliser les registres de qubits, etc. , est énorme (voir p. ex. le site de Julia Wallace [1], ou les systèmes décrits dans [2, 3]).

On sait que la complexité algorithmique des calculs quantiques n'est pas comparable avec la théorie classique, et qu'un ordinateur quantique peut résoudre en temps polynomial quelques problèmes NP-durs, voir p. ex. [4, 5]. Les physiciens également s'intéressent aux calculs quantiques. Ils y voient la *possibilité de simuler des systèmes quantiques quelconques*, les structures de la matière réelle : noyaux atomiques, semi-conducteurs, entités biochimiques, etc., par un ordinateur, c'est-à-dire par un système quantique discret, contrôlable et programmable. Ceci était l'opinion de Richard Feynman [6], et ainsi s'exprime actuellement John Preskill [7], et autres, p. ex. [8]. Pour nous ceci signifie qu'un formalisme permettant de représenter *de manière universelle* des entités quantiques sur l'ordinateur serait utile pour la mise en oeuvre d'une telle simulation, comme un ordinateur classique (un transformateur de bits) est capable de simuler la physique classique, grâce aux « abstractions implémentables » : les nombres flottants, les vecteurs, etc.

L'ambition de ce travail reste limitée. Nous avons implémenté les objets quantiques : les états et les opérateurs, dans le cadre de la programmation fonctionnelle pure. Ceci nous a permis d'établir une plate-forme conceptuelle commune entre le monde du calcul assisté par ordinateur, et l'épistémologie typique d'un physicien théoricien réaliste. Cependant, ce sont les débuts d'un projet de longue haleine.

2 Réalisme et abstraction

2.1 L'état classique est un ensemble d'observables

Comme il a été dit, une particule classique est simulée par une structure de données qui contient (\vec{x}, \vec{p}) . Le mouvement constitue le changement de ces variables dans le temps. La construction des programmes qui gèrent ces équations est un jeu d'enfant, et actuellement *peut être réalisée par les enfants*, voir [9]. Un bit classique peut représenter un spin discret orienté : \uparrow ou \downarrow selon un axe, et c'est tout. On peut observer qu'un vecteur physique *n'est pas* un triplet de nombres (x, y, z) car ceux-ci dépendent du système de coordonnées, mais le choix de ce repère est épistémologiquement neutre, tous sont équivalents.

Les structures de données :

```
data Bit = Up | Down          -- ou : B0 | B1, etc.
```

```
data Particle = Xp Vect Vect  -- où :  
data Vect = V Real Real Real
```

peuvent représenter deux systèmes classiques mentionnés ci-dessus. Les constructions ci-dessus sont écrites en Haskell [10], un langage fonctionnel pur, disposant d'une notation très compacte. La forme **data** spécifie un type composite, un « record » avec des variants séparés par la barre |. Les symboles **Up**, **Xp** ou **V** ne sont que des noms (balises) sans interprétation, permettant d'identifier les données. La forme **(V 1.0 2.0 3.5)** représente un vecteur avec trois composants. Une particule possède deux vecteurs comme attributs. Le choix du repère n'a pas d'importance, même s'il est obligatoire. La dynamique consiste à définir des fonctions de type, par exemple **Time** \rightarrow **Particle**, où **Time** peut être un nombre réel, ou discret, selon le modèle de temps adopté.

2.2 Problèmes avec un « objet quantique »?

Dans la théorie quantique orthodoxe, l'état n'est pas un « record » mais un vecteur, disons $|\Psi\rangle$ (notation de Dirac) dans un espace métrique (qui peut être de dimension infinie). La base de cet espace est très importante, car chaque vecteur de base identifie une configuration observable. Les composantes du vecteur-état dans une telle base, par exemple le produit scalaire $\Psi(x) = \langle x|\Psi\rangle$, spécifient l'amplitude de probabilité de trouver le système dans chacune de ces configurations. En général, ce qui est observé est la *moyenne* d'un opérateur, disons, \hat{A} dans un état : $\langle\Psi|\hat{A}|\Psi\rangle$. La « notion d'observation » est intrinsèquement liée au « repère » dans l'espace de Hilbert. Des bases différentes peuvent être assimilées à des conditions d'observation différentes. Toute observation concrète risque de changer l'état du système. Ce système sera filtré de manière à ne laisser qu'une seule composante, la projection sur un axe de la base. Concrètement, si une particule libre, avec sa quantité de mouvement bien définie est représentée par une fonction de Schrödinger, elle est distribuée partout dans l'espace. Le système possède « toutes » les composantes x . Cependant, toute observation de cette particule va la localiser dans l'espace, son état quantique changera.

Si nous accordons une signification pragmatique *réaliste* au mot **simulation**, une structure implémentable dans un langage de programmation devrait correspondre à une entité dans le monde réel. Or, dans le cas de la simulation quantique, la situation devient ambiguë, car personne ne connaît cette entité. Il n'existe aucun modèle épistémologique classique d'un « qubit », un bit quantique qui peut se trouver dans un état de superposition de « \uparrow » et de « \downarrow ». Mais un ordinateur quantique *doit* opérer avec de tels objets.

La dépendance temporelle et donc l'évolution du système peut être vue comme la dépendance de l'état (représentation² de Schrödin-

2. ang. *picture*

ger) avec des observables complètement statiques, ou comme l'évolution des opérateurs (représentation de Heisenberg) tandis que l'état reste immuable. Comment implémenter l'évolution du système en informatique?

L'état qui décrit deux sous-systèmes peut *ne pas être séparable* même si les sous-systèmes sont indépendants (le paradoxe d'Einstein-Rosen-Podolski[11]). On ne peut parler de l'état « pur » d'un sous-système, si jamais il était en contact avec un autre ! Comment simuler un système quantique composite?

La relation entre le résultat observable et les entités théoriques est indirecte. Ceci rend difficile la séparation entre le système simulé, et l'observateur. Le monde devient *inséparable*, ce qui peut éventuellement nous déranger philosophiquement, mais remet en question la possibilité de construire un simulateur méthodologiquement propre. Si on ajoute ce fait au non-déterminisme *absolu* des systèmes quantiques, le fait que la théorie – apparemment fondamentale – *refuse* de prédire le résultat d'une expérience sur un individu, et demande que l'on se place dans le cadre d'observations statistiques – les chances de « mettre une particule quantique » dans l'ordinateur sont faibles.

On sait comment passer d'une représentation à l'autre, et on sait également que les quantités mesurables ne dépendent pas de notre choix de représentation. Mais si nous voulons construire un formalisme permettant la modélisation de l'évolution *autonôme* du système, indépendamment de l'observation, il *faut* que la représentation des états soit indépendante de la base. Au nom du réalisme et de l'objectivité nous exigerons de notre langage de modélisation qu'il puisse définir et manipuler des *objets abstraits*. Nous construirons un formalisme permettant de représenter $|\Psi\rangle$, plutôt que la fonction d'onde $\langle x|\Psi\rangle$, ou $\widetilde{\Psi}(p) = \langle p|\Psi\rangle$, la fonction d'onde dans l'espace des impulsions, qui est la transformée de Fourier de $\Psi(x)$, et correspond à une autre base d'observations.

Il ne faut pas sur-interpréter le mot « abstraction » vu de la perspective de ce travail. Un type de données abstrait dénote des objets dont la structure interne n'est pas observable, dont toute communication passe par des « propriétés contractuelles » (des « méthodes », dans le jargon de la programmation par objets), et codées en accord avec les spécifications du *hardware* ou de la machine virtuelle.

3 Abstractions fonctionnelles

Un objet, p. ex. un vecteur abstrait, est une entité géométrique **réelle**, qui existe indépendamment de l'observateur. Cependant, si nous voulons *transmettre nos connaissances* de cet objet, il faut le « concrétiser », c'est à dire : présenter ses composants, trouver son instance dans un repère. Ceci est vrai également dans la physique classique, seulement le passage classique entre les représentations est neutre, tandis que dans la physique quantique il est actif : modifie les résultats des expériences ultérieures. De plus, selon les règles de la théorie quantique *un état arbitraire ne peut être copié*, « cloné »[12], ce qui constitue une contrainte très non-naturelle dans le domaine de programmation sur des données classiques.

Le reste de notre travail tourne autour de la thèse suivante : actuellement le meilleur modèle calculatoire, implémentable sur ordinateur, utilisable par tous, et capable de décrire des abstractions du genre trouvé dans l'analyse des systèmes quantiques, est la **programmation fonctionnelle**. Ses paradigmes semblent être relativement bien appropriés à la création d'entités abstraites (réalisées comme des objets fonctionnels), et permettent de leur imposer plusieurs caractéristiques mathématiques de manière assez naturelle et générique. Un objet fonctionnel est opaque, sa seule « concrétisation » est son application à un ensemble de données.

De plus, si on le veut, on peut voir une autre analogie conceptuelle

entre les objets quantiques et les objets fonctionnels. Les deux possèdent des « potentialités ». Celles des objets quantiques sont liées à la dépendance des attributs du système des conditions de l'observation (et à la structure probabiliste de la théorie). Un objet fonctionnel avant d'être appliqué, reste également « potentiel ».

Nous avons réalisé un petit paquetage en Haskell – un langage fonctionnel pur, polymorphe, typé statiquement avec l'inférence automatique de types (extension du système de typage de Hindley-Milner), et paresseux. Le paquetage construit de manière très générique les vecteurs d'état, les observables etc., et exploite au maximum la généralité de l'approche, la possibilité d'utiliser les mêmes mécanismes combinatoires (bases duales, produits tensoriels, etc.) indépendamment du système quantifié. L'analyse mathématique nous enseigne que *les fonctions constituent un espace vectoriel*. Nous allons construire concrètement ces fonctions, et nous allons équiper l'espace de ces fonctions avec un produit scalaire « naturel », ce qui génère un espace métrique avec des bonnes propriétés, donc un espace de Hilbert.

Le cadre construit est suffisant pour résoudre des exercices typiques en mécanique quantique, et permet également la construction générique de « circuits quantiques », pour manipuler les qubits, et réaliser quelques algorithmes quantiques récents, qui ont fait belle carrière.

3.1 Comment quantiser un système dynamique?

Prenons un système physique classique : un rotateur décrit par son axe de révolution et l'angle azimutal, ainsi que par sa vitesse de rotation, ou un oscillateur harmonique, décrit par la position et par l'impulsion d'une particule qui oscille. Ou encore, un système à deux états, p. ex. un atome dans son état de base, ou excité.

Comme nous l'avons dit, une configuration classique constitue la

spécification d'une *base naturelle* dans un espace vectoriel. Elle est une « étiquette » (balise) qui identifie un vecteur abstrait.

Parfois les informations classiques répertoriées ci-dessus sont redondantes de manière inacceptable. Sans même engager la théorie des observations quantiques et le principe d'incertitude de Heisenberg, nous pouvons dire que des attributs considérés complémentaires, comme la position et l'impulsion, ou l'angle et le moment cinétique associé, constituent des *bases alternatives*.

Voici donc quelques spécifications de configuration de systèmes dynamiques en Haskell. Dans le cas discret, fini, on énumère les vecteurs de base. Un système à deux niveaux qui peut se trouver (classiquement) dans l'état **B0** ou **B1** est symbolisé par un type de données équivalent à **Bit** introduit auparavant, mais nous lui donnerons un autre nom : **data Qubit = B0 | B1**. Voici d'autres systèmes :

```
data Rotator=Ang Real Real |Jm Integer Integer
data Oscil  =X Real | P Real | N Integer
```

Pour une particule *toute position*, ($x = 1.65$ ou $x = -12.985$ etc.), constitue une configuration différente. Nous en avons un nombre illimité, et leur énumération n'est pas possible, donc nous utilisons un type paramétré, p. ex., **X Real** exactement comme dans le cas classique. Mais nous *savons* qu'en mécanique quantique l'impulsion et la position d'une particule correspondent aux observations *complémentaires*, incompatibles. Un état de base peut donc être soit étiqueté par une position, soit par une quantité du mouvement.

Un rotateur peut *aussi*, alternativement, être représenté par une paire (j,m) , où j représente le moment cinétique total, et m sa projection sur un axe. À l'oscillateur nous avons ajouté une balise paramétrée par un entier : **N n** (avec n non-négatif, même si ceci n'est pas explicit), qui constitue la base de Fock, la spécification du niveau d'excitation, ou le nombre de quanta élémentaires décrivant l'énergie du système. Dans tous les cas, ces entités restent abstraites, sans

une sémantique *a priori*, et sans aucune propriété algébrique, sauf la possibilité de les différencier (et d'en reconnaître l'égalité). Nous pouvons créer des instances³ de ces types, p. ex., $\mathbf{q} = \mathbf{N} \ \mathbf{6}$ dans le programme, mais pour l'instant c'est tout.

3.2 Comment mettre l'espace de Hilbert dans un PC?

Indépendamment du statut des objets introduits ci-dessus, il est possible, et *universel* au sens catégorique, de créer de véritables *vecteurs* basés sur ces objets. Rappelons que toute fonction d'un espace \mathbb{X} *quelconque*, dans \mathbb{R} ou dans un autre corps (ou un autre espace vectoriel, ce qui est important pour la construction des opérateurs *linéaires*), peut être considérée comme un vecteur, selon les règles :

$$(f + g)x = f(x) + g(x) \quad (1)$$

$$(a \cdot f)x = a \cdot f(x) \quad (2)$$

En Haskell une telle construction est parfaitement naturelle, il suffit de *surcharger* les opérateurs arithmétiques aux objets fonctionnels. Pour des raisons de discipline nous allons construire une nouvelle opération, ($\langle + \rangle$), et définir une *classe* représentant l'ensemble de types qui admettent cette opération. Une des raisons d'avoir choisi Haskell est justement la facilité de définir statiquement les opérations polymorphes, si fréquentes dans l'implantation des structures mathématiques. Supposons que le co-domaine de ces fonctions est un type nommé **Scalar** (d'habitude l'espace de nombres complexes). La construction a la forme

```
class Vspace v where
  (<+>) :: v -> v -> v           -- Aussi : <->
  (*>)  :: Scalar -> v -> v
```

3. dans le jargon informatique ce mot a repris la sémantique de la langue anglaise

Ensuite on déclare son *instance*, en précisant que les fonctions de type **b->Scalar** (ou **b** est un type *arbitraire*) appartiennent à la classe **Vspace**:

```

type Hvector b = b->Scalar

instance Vspace (Hvector b) where
  (f <+> g) a = f a + g a      -- Aussi : <->
  (c *> f) a = c*(f a)

```

Désormais nous pouvons écrire des expressions comme **2.0*>(sin <+> exp)**, qui engendrent des objets fonctionnels applicables aux nombres. Ces objets (fermetures) sont opaques, et non-décomposables. Nous avons notre *abstractio in machina* !

Pour construire de manière naturelle des fonctions-vecteurs associées aux bases quantiques il faut exploiter nos connaissances. Nous savons que pour des bases discrètes dans l'espace des états quantiques, les vecteurs de base sont d'habitude orthogonaux et normalisés. Nous *imposons* donc une certaine structure métrique qui caractérise la base définie par les balises **Qubit**, **Oscil**, etc. Voici une proposition minimaliste, la définition d'une fonction polymorphe **bracket** égale à 1 pour des configurations identiques et zéro pour des configurations différentes (et peut-être d'autre chose si tel est notre choix des bases. Cette fonction, comme toujours, doit être spécifiée dans une classe :

```

class (Eq a) => Hbase a where
  bracket :: a -> a -> Scalar
  bracket j k = kdelta j k  -- Kronecker
instance Hbase Qubit
instance Hbase Oscil  -- etc.

```

par exemple, **bracket (N k) (N l)** égal à 1 si $k = l$, zéro sinon. La construction complète est un peu plus compliquée...

- Pour un oscillateur il faut que k et l soient tous deux non-

négatifs ; pour un rotateur (j,m) la projection m doit respecter $|m| \leq j$, etc., sinon le **bracket** disparaît trivialement.

- Pour les *bases alternatives* l'orthogonalité n'a pas lieu, p. ex., **bracket (X x) (P p) = exp(-ipx/ħ)** où \hbar .
- Plusieurs systèmes admettent des bases non-orthogonales, qui souvent facilitent les calculs.

Le *contexte* (**Eq a**) => ... signifie : un type (symbolisé par **a**) peut appartenir à la class **Hbase** seulement s'il est déjà l'instance de la classe **Eq**. Cette classe est primitive, elle spécifie l'égalité entre deux entités.

On peut passer au point crucial de la construction, à l'*abstraction fonctionnelle* dont le résultat est un vecteur. Dans un style « Lispien » on écrirait

axis x = \y -> bracket x y

où « \ » est le « lambda » de Church, le constructeur des objets fonctionnels. Sachant que Haskell respecte l'ordre *normal* d'évaluation des formules : **f a b c** \equiv **((f a) b) c**, et que les définitions **f x = P**, et **f = \x -> P** sont synonymiques, nous pouvons écrire directement **axis = bracket**.

Les « axes » constituent nos bases quantiques, des véritables vecteurs, assimilés aux « bras » de Dirac : **axis (N k)** est le vecteur de base $\langle k |$ de Dirac pour un oscillateur. Les vecteurs $\langle 0 |$ et $\langle 1 |$ dans le monde des qubits, circuits quantiques, etc., seront représentés par **axis B0** et **axis B1**.

Récapitulons :

1. la définition des objets-balises abstraits au sens de ne contenir aucune sémantique naturelle, plus
2. la construction des *abstractions fonctionnelles* sur les objets ci-dessus, plus
3. l'imposition de la métrique selon les principes de la mécanique quantique standard

nous ont permis la construction d'un domaine mathématique parfaitement implémentable, et adapté à la construction de combinaisons linéaires, en accord avec le principe de superposition quantique. Le formalisme est universel et pratique, il a été utilisé pour résoudre des problèmes numériques.

L'espace de configurations de zéro dimensions, fini (disons, 2 valeurs décrivant un bit) engendre l'espace vectoriel bi-dimensionnel. Si l'espace classique possède déjà des dimensions non-triviales, p. ex. « x » est un vecteur uni-dimensionnel, l'espace de Hilbert bâti sur les configurations classiques est infiniment-dimensionnel, *toute* valeur de x est l'indice d'un vecteur de base indépendant.

3.3 États et bases duales

Les axes et leurs combinaisons linéaires sont des « bras », $\langle \psi |$, il nous faut encore les « kets » de Dirac, les vecteurs $|\psi\rangle$ qui représentent les états eux-mêmes, et dont le produit scalaire avec un vecteur de base, disons $\langle 0 | \psi \rangle$, est l'amplitude de probabilité de trouver la configuration « 0 » dans l'état décrit par ψ .

Nous avons donc besoin de la base duale par rapport aux axes. Dans la géométrie, la dualité connecte les vecteurs contra- et covariants. Cependant, les constructions duales sont aussi universelles au sens catégorique, les duaux d'un ensemble de vecteurs sont la famille des *fonctions linéaires* sur cet ensemble. Nous savons déjà qu'elle peut constituer un espace vectoriel, et c'est le cas, car le co-domaine des kets est scalaire.

L'application d'une telle fonction **est** la construction du produit scalaire approprié. Les kets *élémentaires* associés aux axes primitifs sont donnés par

ket alpha = \ax -> conj ax alpha

où **conj** est la conjugaison complexe définie sur les fonctions, (**conj**

$f) \mathbf{x} = \text{conjugate } (f \mathbf{x})$ (ou : $\text{conj } f = \text{conjugate } . f$, où $(.)$ est l'opérateur de composition fonctionnelle : $(f . g) \mathbf{x} \equiv f(g \mathbf{x})$). La forme $3.5^* \rightarrow \text{ket } (N \ 1] \leftrightarrow 1.2^* \rightarrow \text{ket } (N \ 0)$ est parfaitement légale, et, en omettant quelques détails techniques, la construction est conceptuellement terminée.

D'autre part, le formalisme définit naturellement une transformation permettant de transformer un ket en un axe, et ainsi de donner à l'utilisateur la possibilité de définir le produit scalaire de deux kets, ce qui correspond à l'amplitude de probabilité de recouvrement de deux états. Cette opération, nommée **dual** est donnée par une formule très simple

$$\text{dual } \text{kt} = \text{kt} . \text{axis}$$

Le produit scalaire $\langle \phi | \psi \rangle$ de **psi** et **phi** aura la forme **psi (dual phi)**. Voici la vérification quand **psi=ket alpha** :

$$\begin{aligned} (\text{ket } \alpha)(\text{dual } \phi) &= \text{conj}(\phi . \text{axis}) \alpha \\ &= \text{conjugate } ((\phi . \text{axis}) \alpha) \\ &= \text{conjugate } (\phi (\text{axis } \alpha)) \end{aligned}$$

ce qui correspond à la propriété exigée du produit scalaire : $\langle \phi | \psi \rangle = \overline{\langle \psi | \phi \rangle}$. Bien sûr, notre construction n'est pas la solution d'un problème quantique concret, elle fournit seulement un *cadre* abstrait, mais exécutable par un programme de simulation.

3.4 Opérateurs

Les opérateurs linéaires qui agissent sur les états en produisant d'autres, sont les ingrédients fondamentaux de la physique quantique. En fait la *seule chose* que l'on peut faire avec un état (sauf le calcul du produit scalaire avec un vecteur dual), est de lui appliquer un opérateur. Les opérateurs sont des « observables » : ils déterminent l'évolution du système, réalisent des symétries, etc. Ils sont des objets fonctionnels du genre : **Ket -> Ket**.

Dans des cas discrets ils peuvent être représentés par des matrices (finies ou infinies), mais ceci implique le choix d'une base concrète, et son instanciation. Dans notre formulation, toute une famille d'opérateurs peut être construite par des combinaisons linéaires de formes primitives (« dyades ») $|\alpha\rangle\langle\beta|$, il faut seulement préciser s'il s'agit d'un opérateur qui agit sur les kets : $|\alpha\rangle\langle\beta| \cdot |\psi\rangle = \langle\beta|\psi\rangle|\alpha\rangle$, ou de son dual (adjoint) applicable aux axes $\langle\phi|$ ce qui donne $\langle\phi|\alpha\rangle\langle\beta|$. Le premier et le second possèdent des définitions différentes (adjointes) :

```
kdyade a b = \kt -> (kt (axis b))*>ket a
adyade a b = \ax -> (ax a)*>axis b
```

L'existence des combinaisons linéaires est assurée par le fait que le langage Haskell permet l'instanciation récursive des classes (et pas seulement la définition de types récursifs comme des listes), par exemple

```
type Hmat b = Hvector b -> Hvector b
```

```
instance Vspace (Hmat b)
```

```
  where
```

```
    (f <+> g) a = f a <+> g a
```

```
    (c *> f) a = c*>(f a)
```

c'est-à-dire : qu'une fonctionnelle transformant les vecteurs constitue également l'élément d'un espace vectoriel.

Permettons-nous une digression. Depuis des années, les techniques de simulation se trouvent sous le signe de la programmation objet, programmation « donnée-centrique ». Les transformations ou les méthodes constituent une couche un peu secondaire (bien qu'indispensable), et le concept de « réification », la conversion des entités programmables en objets, est très important.

La programmation fonctionnelle renverse un peu ce courant, et psychologiquement, ces manipulations « fonctio-centriques » sont souvent difficiles à accepter. Ceci est un phénomène intéressant, car il devient très vite évident que les fonctions sont également des don-

nées, les fermetures sont des vrais *objets* fonctionnels, et plusieurs paradigmes de la programmation objet (p. ex. l'héritage) y trouvent leur place. Le formalisme présenté montre que la compréhension de quelques détails mathématiques relativement abstraits peut aider à jeter un pont entre les objets et les techniques fonctionnelles.

Nous pouvons à présent construire des opérateurs très pratiques comme la négation dans le domaine des qubits par

qnot = adyade B0 B1 <+> adyade B1 B0

ou l'opérateur d'« annihilation » qui décremente le niveau d'excitation d'un oscillateur, $\sum_n (\sqrt{n}) \cdot |n\rangle\langle n-1|$, voir p. ex. le livre [13]:

oa ax (N n) = sqrt n * ax (N (n-1))

agissant sur les axes, etc. Cependant, l'application⁴ entre un domaine X et le domaine des fonctions sur X est un *foncteur contravariant*. Ceci signifie que si F est une transformation qui effectue la transition $F : X \rightarrow Y$, et $f :$ une fonction agissant sur les $x \in X$, nous aurons « gratuitement » un opérateur induit F^* qui agit sur les fonctions, mais il est du genre $F^* : Y \rightarrow X$, nous construisons en fait l'opérateur adjoint, c'est une construction catégorique classique : $(F^* f)x = f(Fx)$.

Nous pouvons en déduire que dans le domaine dual, l'annihilateur devient l'opérateur de création (il augmente le niveau d'excitation), et qu'heureusement la négation est un opérateur *self-adjoint*, utilisable sans changement dans les deux bases (mais il ne faut pas oublier que $(AB)^* = B^* A^*$). Ceci est facile à prouver, mais l'essentiel est que de telles propriétés soient universelles, indépendantes de tous les détails d'implantation, et surtout, indépendantes de la base.

4. ici : ang. *mapping*

3.5 Simulation et mesures

Dans le cadre de notre formalisme nous avons résolu plusieurs petits problèmes pédagogiques trouvés dans des livres de mécanique quantique. Cependant le résultat était d'habitude « théorique » : les niveaux approximatifs d'énergie d'un système perturbé, ou les valeurs d'un produit scalaire entre les états qui correspondent à un modèle.

Or, dans le cadre de la simulation, l'observateur ne voit aucun produit scalaire. Si la théorie nous donne la valeur de, disons, $\langle 0|\Psi\rangle$, où $\langle 0|$ est la représentation de **axis B0**, un *simulateur* doit construire $p_0 = |\langle 0|\Psi\rangle|^2$, et physiquement engendrer l'entité **B0** stockée dans une structure de données classique, avec la probabilité p_0 ou l'objet formel **B1** avec la probabilité $p_1 = 1 - p_0$.

Donc, notre paquetage est équipé d'un générateur de nombres aléatoires général, capable de produire des résultats aléatoires en accord avec une distribution de probabilité donnée.

Pour un système plus complexe, p. ex., un oscillateur, dont la base est infiniment dimensionnelle, la situation peut paraître difficile. Mais Haskell est un langage paresseux qui permet aisément la définition des structures de données *potentiellement* infinies, par exemple une liste de tous les nombres entiers non-négatifs. L'objet

```
nats = liste_de 0  where
  liste_de n = n : liste_de (n+1)
```

où l'opérateur $(:)$ est le « **cons** » dans Lisp, est une liste $[0, 1, 2, 3, \dots]$ etc., et un tel objet peut être manipulé sans craintes tant que on ne *regarde* effectivement qu'un segment fini de cette structure. Si un système quantique se trouve dans un état typique, d'énergie totale finie, la probabilité de trouver des excitations lointaines décroît vers zéro assez rapidement, et tout échantillon fini construit une distribution « infinie » réalisable, par exemple la distribution de Poisson (distribution *cohérente* des excitations d'un oscillateur qui peut modéliser un laser) : $p_n = \mu^n/n! \cdot \exp(-\mu)$ pour $n = 0, 1, \dots \infty$. La si-

mulation reste implémentable, sauf si l'excitation moyenne μ est trop grande, et la mémoire déborde. . . .

4 Qubits et circuits quantiques

4.1 Systèmes composites et produits tensoriels

Le statut de la composition de deux systèmes indépendants en physique quantique est si spécifique qu'il provoque jusqu'aujourd'hui des discussions et des tentatives de ré-interprétation. En mécanique classique un système composite est l'assemblage formel, par le produit cartésien, de sous-systèmes. Donc, en principe nous pouvons prendre une configuration résultante de cette composition cartésienne, et en faire une base quantique. Nous obtiendrons ainsi la *somme directe* des espaces vectoriels composants. Malheureusement ceci est erroné, et ne correspond structurellement à aucun mécanisme permettant de dériver les propriétés d'un système quantique. (Une telle construction permettrait la séparation *locale* de la base en deux sous-espaces, ce qui serait illégal).

Si nous voulons simuler un système quantique complexe, il faut exploiter des faits établis (voir [13, 14] ou tout livre complet sur la mécanique quantique), et construire des *produits tensoriels* de bases, de kets, etc. Le produit tensoriel $|\psi\rangle \otimes |\phi\rangle$ sera noté aussi comme $|\psi\rangle|\phi\rangle$ ou $|\psi; \phi\rangle$. Si un vecteur dans l'espace de Hilbert est une fonctionnelle linéaire, le produit tensoriel de deux tels vecteurs sera une forme *bi-linéaire*, une fonction qui prend deux arguments. Alors l'ensemble d'un millier de sous-systèmes serait décrit par des fonctions qui prennent un millier d'arguments, ce qui semble un peu bizarre à un informaticien « orthodoxe ». Conceptuellement ceci ne pose aucun problème.

Si nous voulons construire une quantité observable à partir de

$|\psi; \phi\rangle$ il faut construire un *bracket* de Dirac : $(\langle\alpha|\langle\beta|)|\psi; \phi\rangle \equiv \langle\alpha|\psi\rangle \cdot \langle\beta|\phi\rangle$.

La construction en Haskell est délicate, mais assez évidente. Nous définissons la *classe de tenseurs* contenant l'opérateur ($\langle * \rangle$), la multiplication tensorielle

```
class Tensor v1 v2 v3 | v1 v2 -> v3
  where
    (<*>) :: v1 -> v2 -> v3
```

où la clause `| v1 v2 -> v3` précise au système que le type (l'arité) du résultat `v3` est *uniquement* défini par les types des arguments `v1`, `v2`. Nous pouvons ensuite construire quelques instances, en commençant par le fait que pour les scalaires ($\langle * \rangle$) se réduit à une multiplication normale. Plus génériquement, si *un* argument est scalaire, il suffit d'appliquer la multiplication extérieure, déjà connue :

```
instance Tensor Scalar v v
  where
    s <*> v = s * v
```

et la clause la plus importante, récursive, est :

```
instance (Tensor v1 v2 v3) =>
  Tensor (a->v1) v2 (a->v3)
  where u <*> v = \x -> u x <*> v
```

Ceci est difficile à digérer par les scientifiques conditionnés par Fortran, mais aussi par Lisp. Cependant, l'appareillage correspond à la construction des tenseurs dans les livres de géométrie. Nous avons aussi construit des tenseurs duaux (fonctionnelles sur les tenseurs « directs », et nous avons montré comment construire et multiplier des opérateurs agissant sur des états composites. La multiplication tensorielle de deux opérateurs est donnée par la forme récursive

```
op1 <*> op2 = \kt1 kt2 -> op1 kt1 <*> op2 kt2
```

Ceci est indispensable pour toute simulation de systèmes « calculatoires », les circuits quantiques qui opèrent sur des séquences de qu-

bits. Nous aurons donc des opérateurs qui agissent sur des multi-kets, étant des fonctions de plusieurs axes.

Les constructions de ce genre sont presque impossibles à implanter dans les langages impératifs classiques.

4.2 Circuits primitifs

L'évolution d'un système quantique est unitaire, réversible. Ceci signifie qu'aucune opération du genre NAND, XOR, etc., qui combinerait deux qubits en un : $|x\rangle|y\rangle \rightarrow |z\rangle$ n'est légale. De même, une fonction classique d'un bit : $x \rightarrow f(x)$ qui n'est pas explicitement réversible ne peut être « quantisée », convertie en opérateur. Parmi les quatre fonctions d'un bit, seules l'identité et la négation sont légales. Mais il a été démontré que toute transformation peut induire un opérateur réversible, si on lui ajoute des « lignes » : arguments d'entrée et de sortie dans la représentation graphique d'un tel opérateur, comme sur la Fig. 1.

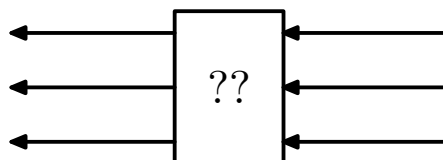


FIG. 1 – *Opérateur multi-linéaire*

Ainsi, l'équivalent de l'opération de différence symétrique XOR est réalisé comme la *négation contrôlée*, CNOT, dont la sémantique est $|x\rangle|y\rangle \rightarrow |x\rangle|x \oplus y\rangle$, représentée sur la Fig. 2, et implémentée par le programme suivant

```
cnot k x y = p B0 + p B1 where
  p b = k (qproj x b) (xor (axis b) y)
```

où

```
qproj x b = x b *> axis b  
xor r = r B0 *> id <+> r B1 *> qnot
```

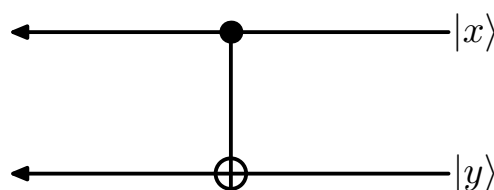


FIG. 2 – « *Controlled-not* »

Notons que nous avons introduit des « miettes », des lignes de sortie qui ne servent vraiment à rien (x), mais qui sont indispensables pour pouvoir inverser le flot de contrôle. La construction du simulateur devient coûteuse, le modèle contient des lignes de transfert d'information qui peuvent facilement proliférer hors de tout contrôle. Heureusement il existe une technique d'optimisation, découverte par Bennet [15] – on effectue une partie du processus, on inverse le flot de contrôle après avoir mémorisé le résultat principal, et en revenant à la configuration initiale on peut « libérer » et réutiliser les lignes qui constituent le « lest ». Cette opération est exécutée périodiquement. Nous travaillons actuellement sur l'implémentation de cette technique, qui est facilitée par la paresse du langage (on n'instancie pas les objets dont on n'a pas besoin). Mais nous voyons que la simulation d'un ordinateur quantique⁵ exploite des astuces qui n'ont aucune raison d'être en informatique classique ; on joue même avec la « flèche du temps », et ceci toujours au nom de la pragmatique réaliste...

5. Il faut préciser que la technique a été proposée dans le cadre des calculs réversibles classiques

4.3 Un exemple simple, problème de Deutsch

Supposons qu'une fonction classique inconnue $f(x)$ définie sur un bit et produisant un bit, doive être analysée, l'utilisateur doit vérifier au moins si c'est une fonction constante : $f(0) = f(1)$ ou non. Classiquement il faut la mesurer deux fois. Deutsch a montré que si on arrive à la transformer en un opérateur quantique, nous pouvons l'appliquer à une superposition de deux qubits, et obtenir le résultat final après *un* pas (accompagné d'un filtrage, mais sur un système quantique ceci constitue une opération de mesure primitive). Le résultat doit être « classique », c'est à dire déterministe ; le système doit répondre **B0** ou **B1** avec la probabilité 1 (concrètement, le vecteur résultant est proportionnel soit à **ket B0**, soit à **ket B1**, et non pas à une superposition ambiguë). Le circuit sur la Fig. 3 réalise cet algorithme. On commence par la préparation de deux qubits d'entrée, figés à $|0\rangle$ et $|1\rangle$. Ensuite on leur applique la transformation de Hadamard, qui effectue les transformations $|0\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$, et $|1\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle)$ (la représentation matricielle souvent citée de cette transformation est $\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$). Ce mélange est transmis au module décisif qui est la généralisation de notre négation contrôlée : $|x\rangle|y\rangle \rightarrow |x\rangle|f(x) \oplus y\rangle$. Le résultat est obtenu par la transformation de Hadamard (qui est une involution, c'est-à-dire, son propre inverse) sur une ligne, tandis que l'autre est abandonnée.

L'implémentation du circuit est simple.

```
had = sqrt 0.5 *(qnot <+> adyade B0 B0
                    <-> adyade B1 B1)
inp = (had <*> had) (ket B0 <*> ket B1)
-- functions :
fmut = id
fcst = const B0
```

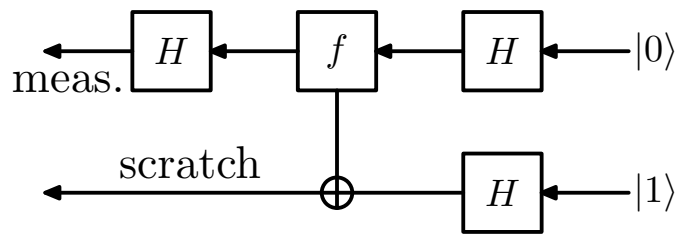


FIG. 3 – *Problème de Deutsch*

-- *Résultats :*

```
xout = (had <*> id) (fcnot fmut inp)
```

```
yout = (had <*> id) (fcnot fcst inp)
```

où fcnot généralise cnot

```
fcnot f k x y = p B0 + p B1 where
```

```
  p b = k (qproj x b) (xor (axis (f b)) y)
```

et est représenté par le sous-circuit similaire à **cnot**, avec le disque noir remplacé par la boîte contenant f . Pour pouvoir tester la validité de ce programme il aurait fallu compléter la définition des opérateurs tensoriels, ce qui aurait pris trop de place dans cet article. Pour atteindre notre but il nous suffit d'avoir une définition limitée du produit tensoriel de deux opérateurs individuels, qui agissent sur les axes, et qui produit un opérateur agissant sur bi-kets :

```
(o1<*>o2) bkt=\ax1 ax2 -> bkt (o1 ax1)(o2 ax2)
```

Le lecteur doit reconnaître que si toutes ces définitions auxiliaires (et universelles) sont placées dans une librairie, la programmation devient *extrêmement courte*, elle correspond à la spécification graphique du système. Les résultats, **xout** et **yout** sont appliqués à des axes **axis 0** et **axis 1**, et le résultat final est zéro pour la « mauvaise » combinaison.

Nous pensons donc que les techniques fonctionnelles constituent actuellement le meilleur outil de simulation générique des objets quantiques, et peuvent faciliter la programmation des futurs circuits quantiques physiques. Le style est clair, compact, et – ce qui peut être très important – nous ne confondons pas les entités classiques (*nombres* 0 et 1 mesurés), et les bits physiques, qui seront transmutés en qubits. L'abstraction aide à garder la vision réaliste du processus.

5 Conclusions

Comme nous l'avons souligné, l'ontologie quantique est obscure, et notre formalisme est basée entièrement sur des notions acceptées. Nous avons repris les concepts de la physique quantique standard et enseignée, qui sont des objets mathématiques reconnus, et dont la correspondance avec les sciences expérimentales est « respectable ». Nous ne savons toujours pas ce qu'est une particule, mais nous savons comment spécifier le *minimum* de propriétés satisfaites par son *état*. Puisque nous n'avons pas d'autres, l'état et les opérateurs (observables et autres) sont nos seuls acteurs participant à la simulation. Il s'agit d'une approche méthodologique minimaliste, qui profite au maximum des propriétés formelles de la théorie, sans – dans la mesure du possible – figer la représentation des objets quantiques par leur observations.

Les statuts d'un ket quantique, et d'un objet fonctionnel implémenté sur ordinateur, présentent beaucoup d'affinités. La réalisation fonctionnelle explicite le caractère de connaissances dont dispose l'observateur, mieux que toute réalisation « concrète », (par tableaux de bits, listes de nombres complexes, etc.), même si dans des cas concrets une réalisation de cet autre genre peut être (numériquement) beaucoup plus efficace.

La philosophie présentée ici ne se réduit d'ailleurs pas qu'aux sys-

tèmes quantiques. L'approche fonctionnelle « abstraite » appliquée à l'implémentation d'objets géométriques peut être exploitée dans un cadre beaucoup plus classique, comme par exemple dans la synthèse d'images, enseignée de façon la plus *invariante* possible. Les vecteurs, les surfaces, etc. sont des objets fonctionnels indépendants du système de coordonnées (p. ex., lié à la description de la caméra virtuelle ou d'un autre dispositif du rendu). Ceci fait que les formules deviennent universelles et plus faciles à mémoriser.

Cependant c'est le domaine quantique où cette universalité acquiert une nouvelle dimension. Tandis que dans le graphisme c'est un choix qui fait prévaloir la clarté de présentation sur l'efficacité du rendu, dans la description des systèmes quantiques c'est une démarche méthodologique presque obligatoire, qui refuse l'attachement au *système* simulé des connaissances accessoires qui définissent le *contexte d'observation*.

Dans les mathématiques modernes, y compris leurs applications (donc, la physique encore une fois), le statut des équivalences entre les modèles, les homo- ou isomorphismes, l'existence de foncteurs permettant de jeter un pont entre des concepts mathématiques structurellement différents, est devenu extrêmement important. Ceci constitue une des motivations du développement de la théorie des catégories, et la motivation primaire pour que les Naturalistes dont l'éducation mathématique reste très pragmatique, commencent à s'intéresser à ce domaine.

Même si la fascination par la vitesse des calculs, codés par les méthodes les plus rapides (et brutales...) continue, on ne peut échapper au trend global, au fait que la programmation, y compris les techniques de simulation, devient de plus en plus abstraite, générique et universaliste.

Références

- [1] Julia Wallace, site www.dcs.ex.ac.uk/~jwallace/simtable.html ; (2002).
- [2] Bernhard Ömer, *Procedural Formalism for Quantum Computing*, (1998), disponible à tph.tuwien.ac.at/~oemer.
- [3] David Greve, *QDD: A Quantum Computer Emulation Library*, (2002), home.plutonium.net/~dagreve/qdd.html.
- [4] Peter W. Shor, *Polynomial-Time Algorithm for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer*, SIAM Review **41**, n° 2, (1999), pp. 303–332.
- [5] L.K. Grover, *Quantum Mechanics Helps In Searching For a Needle in a Haystack*, Phys. Rev. Lett. **79**, (1997), p. 325. Aussi : L.K. Grover, *A fast quantum mechanical algorithm for database search*, Proc. 28th ACM Symp. on Theory of Computation, (1996), p. 212.
- [6] Richard P. Feynman, *Simulating physics with computers*, Int. J. Theor. Phys. **21**, (1982), p. 467.
- [7] John Preskill, *Quantum Information and Computation*, Lecture Notes for Physics 229, California Institute of Technology, (1988).
- [8] C. Zalka, C. *Efficient simulation of quantum systems by quantum computers*. Online preprint quant-ph/9603026, (1996).
- [9] S. Brandt, H.-D. Dahmen, *Quantum Mechanics on the Personal Computer*, Springer, (1994).
- [10] <http://www.haskell.org> .
- [11] A. Einstein, B. Podolski, N. Rosen, *Can Quantum-mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?*, Phys. Rev. **47**, (1935), p. 777.

- [12] W.K. Wootters, W.H. Zurek, *A single quantum cannot be cloned*, Nature **299**, (1982), p. 802.
- [13] Daniel Kastler, *Introduction à l'électrodynamique quantique*, Dunod, Paris, (1960).
- [14] Diederik Aerts, Ingrid Daubechies, *Physical justification for using the tensor product to describe two quantum systems as one joint system*, Helvetica Physica Acta, **51**, (1978), pp. 661–675.
- [15] C. H. Bennet, IBM J. Res. Develop. **17**, (1973), p. 525. Voir aussi : C. H. Bennet, SIAM J.Comput. **18**, (1989), p. 766.

Le rôle des modèles dans la gestion de l'environnement

Hubert Kieken_Doctorant en Sciences de l'Environnement_CIRED-
RGTE_Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts (ENGREF)

Dans le domaine des recherches sur l'environnement, il semble exister un consensus sur le rôle central que doit jouer la modélisation. Dans leur papier introductif de la revue *Natures, Sciences, Sociétés*, A. Pavé et M. Jollivet estimaient ainsi que la "modélisation (...) constitue le volet méthodologique majeur" du champ de l'environnement. Plus récemment, au cours d'un séminaire organisé par le Ministère de la Recherche, C. Schmidt-Lainé a défendu l'idée que la modélisation constituait un "passage obligé des recherches sur l'environnement" et que, réciproquement, "l'environnement comme secteur de recherche d'intégration de disciplines apparaît comme un «*cas d'école*» pour la modélisation". Malgré son apparente banalité, ce dernier constat reflète en réalité un fort *a priori* sur ce qu'est la modélisation : un outil d'intégration pluridisciplinaire. Il s'agit là d'une hypothèse réductrice car, comme l'avaient remarqué Jollivet et Pavé, la modélisation dans le domaine de l'environnement présente "plusieurs facettes, notamment : _ - l'utilisation du modèle comme élément du langage et de la pensée scientifique ; objet et outil de la pensée conceptuelle ; _ - (...) l'intégration du modèle à l'approche expérimentale, c'est à dire la mise en œuvre d'une dialectique modèle-expérience ; _ - l'approche spéculative, à savoir l'analyse des propriétés d'objets formels, le plus souvent mathématiques et l'interprétation de celles-ci comme comportements possibles d'objets réels ; _ - (...) 'utilisation des modèles pour définir des actions régulatrices (contrôles)"

Par ailleurs, l'observation des pratiques montre que cette diversité des usages – qui peut d'ailleurs être encore enrichie – renvoie le plus souvent à des approches différentes de la modélisation. En fonction du contexte décisionnel, de l'état d'avancé du débat, la nature des modèles mobilisés et les modalités de mise en œuvre des exercices de simulation diffèrent sensiblement. Malheureusement, ces éléments de contexte sont souvent uniquement traités comme des générateurs d'interférences parasites dans le travail de production scientifique des modélisateurs. Et l'évaluation des **usages** des modèles se réduit parfois à suggérer que de bons travaux scientifiques ont été dévoyés par leur utilisation hors de leur domaine de validité ou à des fins politiques. Dans un article analysant le rôle de la modélisation dans le domaine de l'environnement, on trouve le commentaire suivant : "On sait, par exemple, que les modèles

climatiques globaux et les modèles macroéconomiques ont joué un rôle important au cours de la conférence de Kyoto. Malgré toutes les précautions prises par le GIEC dans la formulation des résultats, ils ont été utilisés comme arguments essentiels dans ces négociations". Suggérer que les travaux du GIEC aient été réalisés indépendamment du contexte des négociations internationales sur la question du changement climatique est évidemment excessif, en particulier pour les modèles économiques dont "on sait" également qu'ils véhiculent certaines visions du monde de leurs auteurs. Par ailleurs des enquêtes et des études de terrain ont également montré que même les modélisateurs du climat pouvaient être amenés à prendre en compte le contexte des négociations dans leurs travaux.

Il nous semble donc que ces éléments de "contexte" ne doivent pas être rejetés hors du champ scientifique, mais être au contraire considérés comme des éléments structurants – parmi d'autres – pour les exercices de modélisation. Il ne s'agit pas ici de tomber dans la dénonciation des "valeurs" et des *a priori* des modélisateurs qui se retrouvent dans les résultats de leurs simulations ou de mettre en cause la "neutralité objective" de leur contribution à la gestion de l'environnement. Mais *a contrario*, il nous semble important de reconnaître que le contexte de production des modèles comme celui de leur mise en œuvre (et en particulier le fort niveau d'incertitudes, l'incomplétude des connaissances et l'importance des enjeux sociaux, économiques ou géopolitiques qui caractérisent la problématique du changement climatique) influent sur la nature et la teneur des travaux scientifiques mobilisés. Nous considérons enfin que cette proximité entre recherche et action d'une part et les interactions réciproques qui en résultent d'autre part doivent être prises en compte dans l'évaluation des travaux scientifiques de modélisation. Nous défendons donc l'idée selon laquelle la réflexion sur les usages de la modélisation pour la gestion de l'environnement a moins besoin d'une évaluation des modèles "dans l'absolu", mais de celle des processus de modélisation dans leurs contextes. Le critère d'une telle évaluation ne doit donc pas être le "vrai", mais la "pertinence" ou la "validité" au regard d'un contexte de gestion ou d'une problématique environnementale donnés.

Afin de faciliter ce travail d'analyse des travaux de modélisation dans leur contexte de production, nous nous proposons donc d'esquisser une typologie des usages des modèles dans le domaine de la gestion de l'environnement. Pour chacune des fonctions identifiées, nous tenterons de dégager quelques caractéristiques des modèles utilisés à partir d'exemples archétypiques de la catégorie considérée.

Quels usages des modèles pour la gestion de l'environnement ?

Lorsque l'on s'interroge sur le rôle des modèles pour la gestion de l'environnement, la première fonction qui vient à l'esprit est celle d'expérience virtuelle. Un modèle qui représente le fonctionnement d'un système naturel ou biophysico-chimique permet de simuler les conséquences de divers scénarios de gestion ou autres mesures de régulation. En retour, il permet à son utilisateur d'apprécier l'impact de ces mesures sur le système réel et de décider de l'opportunité ou non de les mettre en œuvre en fonction de ses propres critères d'évaluation qui peuvent être multiples (économiques, environnementaux, etc.). Typiquement, un modèle de qualité de l'eau à l'échelle d'un bassin versant permet de comparer les bénéfices escomptés de deux scénarios de construction de stations d'épuration. Un tel modèle joue donc le rôle *d'outil de gestion* pour l'objet environnemental simulé.

Malheureusement, peu de problématiques environnementales peuvent être traitées de la sorte, en partie parce que certaines composantes des systèmes considérés peuvent n'être que partiellement modélisables (par une compréhension incomplète des mécanismes en jeu, par un fort niveau d'incertitudes sur les dynamiques futures...), ou parce que l'intégration des différentes dynamiques du système dans un modèle unique se révèle difficile, voire impossible. Dans ce type de situations, les résultats des différents modèles disponibles (qui résultent de points de vue souvent sensiblement différents) sont rarement tous identiques. Les modèles et leurs résultats sont alors utilisés comme des arguments dans un débat plus général sur les enjeux environnementaux considérés. On parlera alors de *modèles-arguments* ou de *modèles-plaidoyers*.

La situation précédente suppose que l'enjeu environnemental soit considéré comme tel pour pouvoir disposer d'un jeu de simulations contradictoires. En d'autres termes, ceci nécessite que la problématique en débat ait été portée sur les agendas scientifiques et politiques. Ceci nécessite le plus souvent une étape préliminaire de découverte des enjeux, voire d'alerte dans laquelle certains modèles peuvent également être amenés à jouer un rôle. Nous les désignerons sous le terme de *modèles-lanceurs d'alerte*.

Les modalités de sortie d'une situation de débat pour aboutir à une prise en charge effective des enjeux environnementaux considérés diffèrent sensiblement selon l'échelle géographique à laquelle le problème est traité. Au niveau international, et contrairement à l'échelle nationale, il est le plus souvent

nécessaire d'aboutir à un quasi-consensus entre les Parties. A nouveau, la convergence entre les différentes positions peut-être facilitée par l'utilisation d'un modèle qui aide à la synthèse des points de vue ou qui fournit des évaluations quantifiées des différentes propositions en cours de discussion. On parlera alors de *modèles de consensus*.

Les modèles lanceurs d'alertes

Le plus célèbre exemple d'exercice de modélisation entrant dans cette catégorie est très certainement le modèle *World 3*. Développé à partir de travaux préliminaires de J. Forrester, les résultats de ces travaux réalisés au M.I.T. et dirigés par D. Meadows ont été publiés dans un livre à grand succès (*Limits to Growth*) qui constituait également le premier rapport du Club de Rome. Le large succès rencontré par le livre et le modèle a sans aucun doute bénéficié de la polémique sur l'arrêt de la croissance qu'ils ont engendré. Mais il résulte également de la volonté et du travail du Club de Rome dont l'objectif explicite était de communiquer un certain nombre de messages aux élites dirigeantes comme au plus grand nombre. En ce sens, il s'agit d'un exemple archétypal de processus de préparation et de diffusion d'une "alerte" sur les dysfonctionnements de la société. Et de ce point de vue, l'exercice a été un extraordinaire succès. L'ampleur du débat qui s'en est suivi a d'ailleurs largement surpris les modélisateurs eux-mêmes et ce modèle a probablement eu un impact supérieur à tous ceux qui l'ont suivi. L'association du modèle, du livre et des efforts du Club ont permis la diffusion de deux principaux messages : (a) les croissances exponentielles dans des systèmes finis méritent d'être surveillées et, (b), le monde est un système interconnecté qui ne peut être compris ou géré de façon satisfaisante par des approches purement sectorielles.

Lorsque ce modèle est évalué en le sortant de son contexte de production, nous avons souvent recueilli des appréciations telles que : "*World 3* était tellement stupide", "Ce modèle était scandaleux", etc. Il ne s'agit pas ici de défendre le modèle ou l'exercice *en tant que tels*. Nous sommes par ailleurs bien conscient des ambivalences du discours de l'équipe Meadows qui présentaient tantôt leurs travaux comme essentiellement qualitatifs tantôt les mobilisaient de façon plus normative. Pourtant nous pensons qu'en tant que *modèle-lanceur d'alerte*, l'exercice se distingue de nombreux autres par la diversité des débats qu'il a permis de réouvrir, de re-formuler ou de placer sur les agendas politiques et scientifiques. Il mérite donc d'être évalué dans le contexte du début des années 1970, en fonction des débats de cette période et de sa capacité à reconfigurer l'espace dans lequel il était plongé.

S'il est difficile de proposer des caractéristiques générales pour cette utilisation des modèles, l'analyse du débat sur les limites de la croissance fournit quelques informations sur les facteurs de succès de cet exercice. Nous avons évoqué précédemment la “stratégie” de communication sans précédent dont a bénéficié ce travail qui explique à elle seule une grande partie de la diffusion de ses résultats auprès d'un large public. Mais il serait réducteur de résumer cette stratégie à la seule “couverture médiatique” dont a bénéficié l'ouvrage *Limits to Growth*. Elle inclut également le travail préparatoire du Club de Rome pour trouver une forme adaptée au message : pendant plus de deux ans le Club a exploré de nombreuses pistes avant de trouver le “bon média” en la forme d'un modèle informatique proposé par J. Forrester. Par ailleurs, cette stratégie de communication n'aurait pas abouti si le message n'avait pas bénéficié du contenu que lui a apporté le modèle. De ce point de vue, le contraste entre le succès du premier rapport du Club de Rome et l'échec relatif de ceux qui ont suivi s'explique probablement par l'effet de nouveauté (du message, de la méthode utilisée, etc.) mais également par la simplicité des résultats présentés par rapport à ceux qui ont suivi. Parce qu'il était simple voire simpliste, *World* a donc agi comme un facilitateur de débat, aidé en cela par la grande transparence de la démarche...

Enfin, si la forme de “prophétie de malheur” prise par ces travaux n'est pas représentative de l'ensemble des travaux visant à faire reconnaître un danger ou une problématique environnementale, il apparaît néanmoins que la grande majorité des travaux qui se retrouvent dans cette catégorie se caractérisent par une difficulté à faire reconnaître leurs résultats, y compris dans la sphère scientifique. Cette caractéristique du contexte de production des alertes (qu'ils s'agissent de modélisations ou non) nous semble un argument supplémentaire en faveur d'une évaluation des travaux remis en situation.

Le modèle plaidoyer

Les pratiques de modélisation dans le champ de l'environnement sont très diverses, que ce soit par l'étendue des disciplines impliquées, par les corpus théoriques mobilisés ou par les techniques informatiques mises en œuvre. Par ailleurs, un même objet peut faire l'objet de diverses représentations mathématiques . Par conséquent, dans le domaine de l'environnement, il existe presque toujours plusieurs modèles d'une même “situation réelle” , mais c'est également vrai pour les modèles de transports , les modèles économiques ou les modèles globaux . Les modélisateurs comme les gestionnaires sont donc souvent confrontés à une grande diversité d'approches possibles pour la modélisation des objets qui les intéressent. Pour Nicolas Bouleau, il s'agit là d'une caractéristique

essentielle de la modélisation que l'on pourrait qualifier "d'indétermination de la modélisation". Selon lui, le "bon modèle" unique que l'on pourrait atteindre par le perfectionnement des mesures et de la compréhension des phénomènes est purement chimérique voire inexistant, et nous serons toujours confrontés à des modélisations concurrentes qui ne peuvent pas être réfutées par l'expérience. Nous ne prendrons pas ici position dans ce débat sur la nature épistémologique des modèles. Nous nous contenterons de retenir que dans la plupart des situations de gestion de l'environnement les modèles en concurrence ne peuvent être aisément comparés les uns aux autres, qu'ils sont tous "faux" et qu'ils correspondent à des points de vue souvent sensiblement différents portés sur des objets qui ne sont pas parfaitement identiques. Il est donc fréquent que l'on ne puisse pas établir de hiérarchie stricte entre les différentes approches de modélisation disponibles, et que les mérites et les inconvénients de chacun des modèles dépendent des situations auxquelles ils sont appliqués.

Dans de telles situations, les résultats des simulations fournies par les modèles peuvent être légèrement ou très différents, et le rôle des modèles s'apparentent alors à fournir des arguments structurés pour le débat sur les enjeux de gestion étudiés. De ce point de vue, les débats mondiaux et nationaux sur les politiques énergétiques des années 70 et du début des années 80, comme les réflexions du G.R.E.T.U. sur les études économiques des transports fournissent des cas d'école particulièrement riches d'enseignements. Si le premier corpus met en évidence des débats sans fin opposant des travaux fondés sur des hypothèses et des visions du monde quasiment irréconciliables, les travaux du G.R.E.T.U. qui se sont intéressés aux liens existant entre les études économiques dans le domaine des transports urbains et les décisions pour lesquelles elles ont été conduites ont conduit le groupe à introduire la notion "d'études-plaidoyers". Le constat de départ de ces derniers provient de la faible *probance* de la plupart de ces études technico-économiques : les conclusions des études ne "prouvent rien" et auraient pu être largement différentes si d'autres données – aussi légitimes – avaient été utilisées, ou si un point de vue légèrement différent avait été adopté par les chercheurs. Confronté à ce constat, le G.R.E.T.U. a néanmoins "*montré que les études économiques restaient, même imparfaites, un moyen irremplaçable pour éclairer les choix*". En effet, si "*beaucoup d'études économiques ne concluent pas à des vérités indiscutables, elles présentent l'intérêt, si elles sont bien faites, de suggérer des propositions non invraisemblables*".

Si nous ne reprenons pas les propositions du G.R.E.T.U. pour sortir de ce dilemme (fondées sur des "*institutions utopiques*"), nous retenons la nécessité de

s'interroger sur les modalités de gestion de ces situations qui nous sont familières. A ce titre, par comparaison à d'autres cadres méthodologiques, la modélisation présente l'avantage de faciliter l'explicitation par les protagonistes des divergences de leurs résultats par celles des hypothèses insérées dans les modèles. A nouveau, ces "limites" de la modélisation et le caractère "partisan" de ces travaux ne doivent pas conduire à dénoncer le manque d'objectivité des modélisateurs ou à rejeter les résultats des simulations "polluées" par le contexte gestionnaire, mais à affirmer la nécessité d'organiser la mise en discussion de ces travaux de modélisation-plaidoyers, voire l'organisation d'un débat contradictoire fondé sur des modélisations divergentes. C'est d'ailleurs un des rôles du GIEC à propos des modèles économiques traitant du changement climatique (réf hourcade).

Le modèle comme outil de création de consensus

Comme évoqué précédemment, cette fonction des modèles est plus spécialement liée aux contextes de négociations internationales pour la gestion d'enjeux environnementaux. Suggérée par Edwards a propos des modèles d'évaluation intégrée utilisés dans le cadre des négociations sur le changement climatique, cette fonction des modèles s'inscrit dans le cadre de la théorie de Peter Haas sur le rôle des "communautés épistémiques" dans le succès des accords internationaux sur la gestion de l'environnement. Ce dernier suggère que le succès de ces négociations internationales est grandement facilité par l'existence d'une communauté d'acteurs (chercheurs, gestionnaires, etc.) qui partagent (1) une compréhension commune des enjeux environnementaux considérés (par exemple le fait que le "système terre" pourrait être affecté de façon durable et profonde par le changement climatique), (2) certaines valeurs (le "système terre" mérite que l'on (s')investisse s'il est mis en danger par ces modifications) et, (3) une même grille d'analyse du problème. Dans l'élaboration de cette culture commune, les modèles informatiques peuvent jouer un rôle considérable en fournissant ou en matérialisant le cadre commun partagé par cette communauté.

Le cas des pollutions atmosphériques transfrontalières fournit un exemple particulièrement convaincant de cette fonction des modèles informatiques. Le modèle RAINS est utilisé depuis près de vingt ans comme outil d'évaluation pour la plupart des politiques liées à la pollution atmosphérique en Europe. Depuis le début des années 80, le modèle a en particulier été le principal outil d'évaluation mobilisé pour les négociations liées à la Convention sur les Pollutions Atmosphériques Transfrontalières à Longue Distance (LRTAP) entre les pays membres de la Commission Economique pour l'Europe des Nations

Unies. Il a également été utilisé par la Commission Européenne pour l'élaboration de sa stratégie de lutte contre l'acidification, ainsi que pour différents textes liés à la Directive Cadre sur la qualité de l'air. Une des particularités de cet exercice de modélisation est qu'au cours de ces 20 ans de services, le modèle ne s'est jamais figé et a toujours été en constante évolution. Il s'agit donc moins du "modèle RAINS" que d'un processus de modélisation continu qui a su s'adapter et anticiper en permanence les besoins et les questions traitées par les gestionnaires. En deux décennies, l'évolution du modèle a d'ailleurs été telle que la signification de l'acronyme a dû être modifiée : de *Regional Acidification INFORMATION and Simulation* en 1984, RAINS est aujourd'hui le modèle *Regional Air pollution INFORMATION and Simulation* !

L'étude de RAINS est particulièrement révélatrice des caractéristiques de ce type de travaux. Malléable, adaptable à des besoins en constante évolution, conçu en collaboration avec les gestionnaires afin de leur fournir un outil qui reflète leurs besoins, mis en discussion et évalué par ces mêmes gestionnaires. D'une certaine façon, RAINS est plus un outil d'aide à la décision et d'exploration des politiques qu'un modèle au sens classique du terme. Il n'enferme pas la décision dans un carcan informatique, mais il s'ouvre et s'adapte au contraire à toutes les hypothèses décisionnelles que veulent bien lui soumettre les gestionnaires. Mais les clefs du succès ne se limitent pas aux caractéristiques techniques du produit. Elles doivent également être recherchées dans les réseaux humains qui se sont noués autour du modèle. Ces réseaux sont d'ailleurs le résultat de stratégies explicites de l'équipe de modélisateurs pour placer et maintenir leur outil au centre de l'arène. Par exemple, les deux fonctionnaires européens qui ont "recruté" RAINS pour aider la Commission Européenne étaient des "familiers" : l'un des deux avait participé au développement du modèle, et l'autre avait utilisé l'outil en tant que négociateur de la Convention LRTAP pour son pays.

Le modèle comme outil de gestion

Nous terminons cette évocation des différents rôles de la modélisation par celui qui apparaît comme le plus "naturel". Le modèle, parce qu'il est conçu comme un objet intermédiaire entre la théorie et le réel, permet de simuler les effets des mesures de gestion envisagées sur les objets considérés et, en retour, de mettre en œuvre une gestion adaptée et informée. Cet usage des outils de simulations présente la particularité de constituer un "modèle d'utilisation des modèles" pour de nombreux chercheurs ou gestionnaires. C'est le cas par exemple de Jorgensen dans son ouvrage de synthèse sur les modèles écologiques. Le chapitre consacré à l'application de ces modèles pour la gestion des écosystèmes est basé sur un

exemple unique : un gestionnaire d'écosystèmes simule l'impact d'une nouvelle technologie qui réduit les pollutions entrant dans le système. Or cette application des modèles est quasi caricaturale : les mesures de gestion n'interviennent que comme une modification des données d'entrée du modèle, sans aucune forme de bouclage ou d'incertitude sur la dynamique générale du système. La plupart des applications de la modélisation à la gestion des écosystèmes ou de l'environnement sont beaucoup plus complexes : au-delà de leurs effets directs, les mesures de gestion peuvent également avoir de nombreuses conséquences indirectes, plus ou moins prévisibles et parfois franchement indésirables.

Pourtant, malgré son manque de généralité, l'exemple fournit par Jorgensen a pu apparaître satisfaisant parce qu'il correspond à une conception des modèles comme "représentations simplifiées du réel". S'ils sont "bien faits" et "bien choisis" ces "réels simplifiés" capturent les éléments essentiels de la dynamique des systèmes et permettent donc de prévoir – de façon raisonnable – les évolutions (réelles) futures. Malheureusement, l'expérience nous fournit de nombreux exemples de situations pour lesquelles des mesures de gestion de l'environnement fondées sur des travaux de modélisation ont conduit à des échecs, voire à des situations catastrophiques. C'est le cas par exemple des modèles bio-économiques utilisés pour gérer les pêcheries ou des modèles d'érosion des plages qui fondent de nombreux aménagements côtiers aux Etats-Unis. Dans les deux cas, non seulement les modèles décrivaient des réels trop simplifiés pour rendre compte de façon adéquate de la complexité des dynamiques en œuvre dans les systèmes étudiés, mais ils étaient également fondés sur des hypothèses de gestion qui ne sont avérées non pertinentes *a posteriori* (en particulier des hypothèses sur le type de gestion *a priori* le mieux adapté...). Il ne s'agit pas pour nous de remettre en cause la qualité et l'honnêteté de ces travaux en tant que tels ou de renoncer aux apports de la modélisation. Néanmoins, constatant que l'étude *des modèles tels qu'ils se font et sont mis en œuvre* montre certaines limites de la capacité du "modèle comme représentation simplifiée du réel" à *servir* directement les décisions de gestion de l'environnement, nous considérons qu'il faut prendre en compte ces difficultés pour tenter d'améliorer l'utilisation des modèles pour la gestion de l'environnement.

Ces constats et leurs conséquences ne sont pas totalement nouveaux. Ils sont similaires aux réflexions qui ont été à l'origine de l'élaboration du cadre théorique du *Adaptive Management* et qui est fondé sur la reconnaissance de 6 hypothèses fondamentales pour la gestion de l'environnement :

Les connaissances disponibles ne sont jamais adéquates

Un grand nombre de questions ne peuvent trouver de réponses que dans l'expérience acquise au travers des expérimentations

Les connaissances sont plus invalidées qu'accumulées

Les analyses sont toutes simplifiées

Rien n'est certain

Une grande partie de ce que nous savons est faux, mais nous ne savons pas quoi...

Dans ce contexte, la gestion de l'environnement fondée sur les résultats de travaux de modélisation doit s'accompagner d'une représentation des incertitudes et d'une réflexion sur leur impact potentiel sur les politiques mises en œuvre. Mais elle doit surtout être complétée par la mise en place d'un système de suivi et d'évaluation de la dynamique du système considéré afin de vérifier qu'elles sont toutes deux compatibles avec leurs représentations qui ont fondé les décisions. De ce point de vue, le cadre de l'*adaptive management* ne disqualifie pas les modèles. Ces derniers permettent au contraire d'explicitier la compréhension du fonctionnement du système qui prévalait au moment de la prise de décision. Ils fournissent alors un cadre de travail idéal pour comparer les dynamiques effectivement observées avec celles prédites par les simulations qui ont fondé la gestion mise en œuvre.

Conclusion

Comme nous l'avons déjà signalé en introduction, la typologie des usages de la modélisation dans la gestion de l'environnement proposée dans ce texte n'est pas exhaustive. Les fonctions identifiées ne décrivent qu'une partie des nombreux rôles que les modèles jouent dans les arènes de gestion de l'environnement. Il est important de noter que ces rôles ne fournissent pas un cadre d'évaluation des modèles mais de leurs usages. Un même modèle peut ainsi faire l'objet de mises en œuvre variées répondant à des objectifs environnementaux très divers.

En s'intéressant aux fonctions de la modélisation, nous espérons avoir montré la nécessité de réintroduire le contexte de mise en œuvre des modèles dans les réflexions sur leur utilisation pour la gestion de l'environnement. Nous espérons également avoir montré les limites d'une conception de la modélisation comme seule "représentation simplifiée de la réalité" et objet intermédiaire entre la théorie et l'expérience. Les modèles s'élaborent dans un contexte d'enjeux

gestionnaires, en interactions avec de nombreux acteurs, scientifiques ou non. L'histoire de ces interactions influe souvent sur le contenu et la structure des modèles et ne doit pas être négligée dans l'évaluation de ces travaux. Par ailleurs, ces interactions ne doivent pas être rejetées comme ne faisant pas (ou ne devant pas faire) partie de l'activité scientifique. L'observation des processus de modélisation montre en effet que "l'utilité" du modèle est rarement donnée *a priori*, elle se construit dans la relation entre le modèle, les modélisateurs et les "gestionnaires". Cette utilité peut prendre des formes variées qui se retrouvent dans les différents usages de la modélisation évoqués ici. L'inventaire des usages de la modélisation permet donc de préciser et d'améliorer la compréhension du rôle des modèles, de l'histoire de leur développement (dans la plupart des cas les modélisateurs ont conscience du rôle joué par leurs travaux) et des modalités selon lesquelles les modèles doivent être évalués. Il fournit également des éléments d'information pour les gestionnaires afin de mieux appréhender les travaux qu'ils sont susceptibles de mobiliser pour la gestion de l'environnement.

Bibliographie

L'importance des Modèles dans la conception de Simulations

Thomas Meurisse

Laboratoire d'Informatique de Paris 6 – OASIS

8, rue du Capitaine Scott

75015 Paris

Thomas.Meurisse@lip6.fr

1 Introduction

La simulation permet de comprendre, analyser et expliquer des phénomènes complexes. Toutefois, avant d'obtenir des résultats de simulation confrontables avec le phénomène que l'on souhaite étudier, une démarche de modélisation est nécessaire. Nous pensons que les choix de modélisation ne sont pas neutres et risquent d'influencer la viabilité des différentes simulations possibles. Bien que la démarche de simulation ne soit pas nouvelle, ces notions de modèles, et plus exactement de viabilité de modèles par rapport aux phénomènes à étudier, sont rarement clairement spécifiées. Ainsi de nombreuses communautés reprochent aujourd'hui au domaine de la simulation de n'être encore qu'un outil manquant de rigueur, voir même n'accordent qu'un crédit limité aux résultats provenant de la simulation, celle-ci n'étant qualifiée que de « *science expérimentale* ».

Dans cet article, nous cherchons à clarifier la démarche de *conception de simulation*. A partir d'une analyse sur la finalité associée à la simulation par rapport aux phénomènes à étudier, nous montrons qu'il est possible de caractériser plusieurs types de modèles, chacun servant à concevoir l'outil de simulation à différents niveaux. A chacun de ces modèles est associé une communauté d'experts, et la conception de simulation peut-être vue comme un apport incrémental de ces différents experts. Enfin, la dernière section conclut cet article.

2 La simulation comme méthode

Dans l'étude des systèmes complexes, l'utilisation de la simulation peut se faire de différentes manières en fonction des connaissances associées à ces systèmes. [Axtell, 2000] propose une catégorisation en 3 points de vue dans le cas d'utilisation de modèles computationnels agents, mais nous pensons que l'extension à tout modèle computationnel orienté simulation est valable.

1. *Lorsque le modèle associé au système complexe peut être complètement résolu analytiquement.* Il s'agit donc du cas où des solutions du problème sont connues, et leurs résolutions faisables. Dans ce cas l'intérêt de l'utilisation de simulations se limite à l'aide à la présentation de résultats.
2. *Lorsque le modèle associé au système complexe ne peut être que partiellement résolu.* Dans ce cas, il n'est pas possible d'obtenir des solutions complètes du problème analytiquement. Par exemple, lorsque des théories mathématiques permettent la modélisation mais les équations associées ne sont pas directement résolubles ou lorsque aucune solution de modélisation connue ne cadre exactement au problème. Ce cas survient essentiellement lorsque des paramètres exogènes à des solutions de modélisation connues apparaissent dans le problème de base, et qu'il paraît difficilement concevable d'en faire abstraction.
3. *Lorsque le modèle associé au système complexe ne possède pas de solutions.* Soit le problème n'a aucune solution connue aujourd'hui, mais il est possible qu'au moins une solution existe, soit il a été démontré formellement que le problème était indécidable (voir par exemple [Buss et al., 1991]).

Ainsi, l'intérêt associé à l'utilisation des simulations est différent en fonction de chacun des cas définis ci-dessus.

Dans le cas (1), la simulation ne sert pas à obtenir de solutions au problème car des méthodes de résolutions analytiques de bout en bout sont disponibles. Par contre, elle peut permettre de valider *expérimentalement* les résultats obtenus, mais également d'aider à la présentation de résultats.

Dans le cas (3), l'intérêt de la simulation apparaît immédiatement, car c'est *a priori* le seul outil permettant d'obtenir une gamme de résultats plus ou moins fiables, vu l'absence de solutions analytiques.

Le cas (2) est celui qui mérite le plus d'attention, car c'est bien souvent le plus utilisé, mais également celui dans lequel la simulation présente le plus de facettes. Dans ce cas, il existe des solutions analytiques partielles du problème, mais qui ne cadrent pas forcément « parfaitement » au problème initial. Un intérêt de l'utilisation de la simulation est qu'elle permet de quantifier l'influence de paramètres exogènes au problème (ou plus exactement exogène au problème dont une solution est connue, mais qui n'est pas forcément le problème à résoudre/modéliser). Un second intérêt de l'utilisation de la simulation est la possibilité d'étendre le cadre de résolution du problème. Contrairement aux approches de résolutions analytiques, la simulation est beaucoup plus flexible en terme de variabilité du modèle initial. Ainsi il est possible de parcourir une gamme de solutions plus vastes que précédemment (« *Computational models are generally less noisy, easier to control, more flexible, more objective and can be used to examine a larger variety fo factors within less time.* » [Pietrula et al., 1998]).

Quelque soit le cadre d'utilisation de la simulation, l'utilisation de la simulation implique la conception d'un modèle; le processus général de conception va d'une théorie au modèle à la simulation. La théorie peut être directement liée au système réel (celui que l'on souhaite simuler), mais cela n'est pas toujours le cas. L'exploitation de simulations peut aider au développement de théories [Goldspink, 2002]¹. Un des principaux arguments de [Gilbert, 1993] motivant l'utilisation de la simulation est qu'il est difficile de faire de la simulation (« *Paradoxically, one of the main advantages of simulation is that it is hard to do.* ») : toutes les suppositions théoriques associées au modèle doivent être clairement définies, chaque paramètre doit être défini formellement, etc. Cela oblige à tout spécifier, et rendre le moins ambigu possible les hypothèses et les présuppositions. Un des intérêts de cette démarche de systématisation est qu'elle autorise la confrontation des modèles utilisés à d'autres chercheurs.

3 La confrontation de différents acteurs

¹ « [Simulation] provide an explicit and systematic way of deducing the implications of a theory as it operated under particular circumstances to make predictions about outcomes over time » [Hannerman, 1995]

Afin de pouvoir clarifier les notions de modèles et de simulation, nous allons essayer de montrer que différentes communautés sont impliquées dans la conception de simulations.

En tout premier lieu, nous avons le système « réel ». Il peut s'agir d'un phénomène constaté dans le monde réel, ou déjà d'une construction conceptuelle à partir d'une théorie [Axelrod, 1997] (« *thought experiments* »). Ce système appartient à un certain domaine, et implique donc une communauté d'experts dans ce domaine : les *thématiciens*. D'un autre côté, si nous nous plaçons dans le cadre de simulations informatique, la démarche de conception de simulations implique l'écriture d'un ou plusieurs programmes informatiques. Plus généralement, il s'agit d'opérationnaliser de concepts afin d'obtenir une solution informatique simulant un processus. Les experts liés à ce domaine sont donc les ingénieurs informatiques ou *informaticiens*. Chacun de ces experts (thématicien et informaticien) se base sur un modèle qui lui est propre, et lui permet donc d'avancer dans la démarche de conception de simulations. Toutefois, l'écart entre ces deux communautés peut-être très important, et nous pensons qu'une troisième communauté d'experts est impliquée dans le processus de conception de simulations : les *modélisateurs* [Meurisse and Vanbergue, 2001].

Le *thématicien* définit le modèle du domaine à partir du système réel. Partant d'un ensemble de théories et d'observations, il construit un modèle en raffinant les théories et en y ajoutant un ensemble d'hypothèses. Ses contributions s'orientent sur 2 axes complémentaires : il cherche à clarifier les connaissances existantes sur le phénomène à simuler que soit en terme d'ajout d'hypothèses ou au contraire d'abstractions de connaissances, et il guide sa modélisation en fonction des questions auxquels il cherche à répondre. Le modèle du domaine est défini bien souvent dans un langage d'expert lié au domaine du phénomène.

Le but de l'*informaticien* est non seulement de proposer un programme informatique permettant la simulation du phénomène, mais également de fournir un modèle opérationnel permettant la validation des solutions informatiques. Typiquement le modèle opérationnel proposé peut être vu selon 2 aspects. Soit selon un aspect utilitaire au niveau informatique (comment implémenter ou transcrire dans un langage informatique des concepts), soit selon un point de vue de modélisation (utilisation de concepts formels permettant les levées d'ambiguïtés et la discrétisation des

concepts). Un parallèle est possible avec le paradigme de conception orienté objet : les objets sont vus comme des entités de modélisation et permettent la conceptualisation d'informations ou, au contraire, ils servent comme technique d'implémentation et sont utilisés à un grain très fin. Pour être utile, le modèle opérationnel doit être le plus clair possible, ainsi la sémantique associée doit être la plus formelle possible (l'idée étant d'essayer de systématiser le passage du modèle opérationnel au programme informatique).

Il semble évident que le passage du modèle du domaine au modèle opérationnel est difficile. Nous avons d'un côté un modèle défini dans un langage d'expert, peu formel, et très subjectif, et d'un autre côté un modèle opérationnel le plus formel possible ayant donc le moins d'ambiguïté possible. Le modèle de conception permet donc de faire le lien entre ces 2 modèles. Le *modélisateur* part donc du modèle du domaine et le raffine en levant les ambiguïtés liées à l'utilisation du langage du domaine. Il cherche à clarifier l'ensemble des concepts mis en jeu, mais toujours selon l'optique du phénomène à étudier. En cela, il guide la modélisation selon un certain point de vue.

Cette décomposition en 3 rôles distincts (thématicien, modélisateur, informaticien) n'est pas toujours définie comme un couple {rôle, personne}. Ainsi, il arrive fréquemment qu'une personne endosse 2 rôles. Par exemple, un expert en informatique ayant de bonnes notions de modélisation peut facilement endosser les 2 rôles d'informaticien et de modélisateur. Le cas extrême est celui où une personne endosse les 3 rôles; cette personne doit donc à la fois être experte dans le domaine du phénomène à simuler, experte dans le domaine de l'informatique, mais également dans le domaine de la modélisation. En pratique, ces différentes solutions de conception par rapports à une ou plusieurs personnes ne posent pas de problèmes. Par contre, une erreur classique lors de la conception de simulation est l'absence de spécifications liées à un des 3 modèles {modèle du domaine, modèle de conception, modèle opérationnel}.

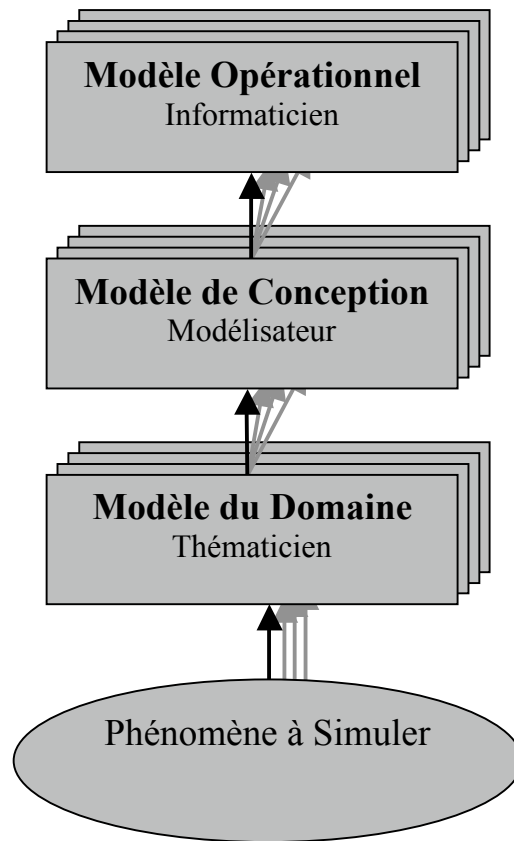


Figure 1: Les différents modèles de conception

Chacun de ces modèles est important car il permet l'échange d'informations entre concepteurs, la mise en évidence des choix de conception aux différents niveaux, etc. Lors de la conception de chaque modèle, des choix sont faits par le concepteur du modèle; ces différents choix définissent le caractère subjectif du modèle et vont donc influencer la conception du modèle du niveau supérieur. La figure 1 présente cette pseudo-hiérarchisation de modèles les uns par rapport aux autres. Il ne s'agit nullement d'une approche méthodologique guidant la conception de bout en bout, mais simplement de l'illustration de l'importance de la conceptualisation des modèles, et des liens qu'ils peuvent avoir entre eux. Cette figure montre l'importance des choix faits aux différents niveaux de conception : à partir du phénomène à simuler, le thématique conçoit un modèle du domaine dépendant non seulement des connaissances qu'il en a, mais également de la finalité de la simulation. Il en est de même pour le modélisateur et l'informaticien, qui vont tous deux bâtir des modèles propres à leurs analyses (et donc dépendants de leurs connaissances et du point de vue à donner à l'outil de simulation), mais également du niveau sous-jacent aux leurs (pour l'informaticien le modèle de conception, et

pour le modélisateur le modèle du domaine). Les flèches de la figure 1 illustrent les dépendances causales entre les différents modèles, à partir de là, des propositions méthodologiques concernant la conception de simulations peuvent être établies, mais sortent du cadre de cet article².

Nous pouvons citer *Sugarscape* [Epstein and Axtell, 1996] comme exemple de simulation dans laquelle certains modèles ne sont pas clairement définis. Il s'agit de simulations de sociétés artificielles dans lesquelles des entités élémentaires évoluent dans un environnement spatialisé et sont capables de se reproduire, de collecter des ressources fournies par l'environnement, et d'échanger ces ressources. Comme il s'agit de sociétés artificielles, le modèle du domaine n'existe pas, ou du moins n'est pas spécifié dans l'ouvrage de référence. L'argumentation des auteurs se base sur la simplicité des simulations et ils montrent que des phénomènes complexes apparaissent lors de simulations informatiques. Toutefois, afin de valider leur approche, la reproductibilité de résultats que montrent les auteurs paraît obligatoire, mais le modèle opérationnel n'est que très partiellement spécifié. Ainsi, de nombreux chercheurs ont essayé de reproduire les résultats obtenus dans *Sugarscape* mais sans résultats probants [Lawson and Park, 2000]³. L'absence de spécifications complètes sur les différents modèles peut biaiser les résultats de simulations, car celles-ci deviennent non-reproductibles [Meurisse et al., 2002].

4 Conclusion

La démarche de conception de simulation reste un exercice très difficile aujourd'hui car peu conceptualisée. Il n'existe que peu de méthodologies associées, et les propositions en ce sens restent limitées [Edmonds, 2000]. Nous pensons qu'avant de faire des propositions méthodologiques, les concepts mis en jeu par le domaine de simulation se doivent d'être clarifiés [Drogoul et al., 2002].

Dans cet article, nous avons tenté de montrer que la conception de simulations se base sur 3 modèles distincts. Chacun de ces modèles a ses

² Une tentative d'approche méthodologique de conception de simulations se basant sur une simplification de cette dichotomie se trouve dans [Drogoul et al., 2002]

³ Une erreur classique de modélisation au niveau opérationnel concerne l'ordonnancement des agents [Meurisse, 2001]

spécificités et dépend donc d'experts aptes à les concevoir. Le caractère subjectif de ces modèles oblige à les spécifier complètement, faute de quoi les résultats de simulations ne peuvent être validés car trop dépendant de choix personnels.

L'effort de modélisation et de clarification des différents modèles utilisés peut enfin permettre le partage de connaissance entre chercheurs d'un même domaine. Il paraît difficile de présenter des résultats de simulation (et donc de déduire des théories à partir de ces résultats), alors que les simulations utilisées sont difficilement reproductibles. Cet effort doit autant se faire dans chacune des communautés impliquées dans la conception : expert de domaine, expert de modélisation, et expert informatique.

Références

[Axelrod, 1997] Axelrod, R. (1997). Advancing the art of simulation in the social sciences. In Conte, R., Hegselmann, R., and Terna, P., editors, *Simulating Social Phenomena*, pages 21--40. Springer, Berlin.

[Axtell, 2000] Axtell, R. (2000). Why agents ? on the varied motivations for agent computing in the social sciences. Technical Report 17, Center on Social and Economics Dynamics - The Brookings Institution.

[Buss et al., 1991] Buss, S. R., Papadimitriou, C. H., and Tsitsiklis, J. N. (1991). on the predictability of coupled automata: an allegory about chaos. *Complex Systems*, 5:525--539.

[Drogoul et al., 2002] Drogoul, A., Vanbergue, D., and Meurisse, T. (2002). Multi-agent based simulation: where are the agents? In *Multi-Agent Based Simulation 2002*.

[Edmonds, 2000] Edmonds, B. (2000). The use of models - making mabs more informative. In Moss, S. and Davidson, P., editors, *Multi-Agent Based Simulation 2000*, volume 1979 of *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, pages 15--32.

[Epstein and Axtell, 1996] Epstein, J. M. and Axtell, R. L. (1996). *Growing Artificial Societies : Social Science from the Bottom Up*. MIT Press.

- [Gilbert, 1993] Gilbert, N. (1993). Computer simulation of social processes. *Social Research Update*, 6.
- [Goldspink, 2002] Goldspink, C. (2002). Methodological implications of complex systems approaches to sociality: Simulation as a foundation for knowledge. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 5(1). <http://www.soc.surrey.ac.uk/JASSS/5/1/3.html>.
- [Hannerman, 1995] Hannerman, R. (1995). Simulation modeling and theoretical analysis in sociology. *Sociological Perspectives*, 38(4):457--462.
- [Lawson and Park, 2000] Lawson, B. G. and Park, S. (2000). Asynchronous time evolution in an artificial society mode. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 3(1). <http://www.soc.surrey.ac.uk/JASSS/3/1/2.html>.
- [Meurisse, 2001] Meurisse, T. (2001). Le contrôle de l'ordonnancement dans les simulations multi-agents. etude et propositions. In *Actes de Atelier Méthodologie et Environnement pour les Systèmes Multi-Agents, Plateforme AFIA*.
- [Meurisse and Vanbergue, 2001] Meurisse, T. and Vanbergue, D. (2001). Et maintenant à qui le tour ? aperçu de problématique de conception de simulations multi-agents. In *Actes du colloque ALCAA : Agents Logiciels, Coopération, Apprentissage & Activité Humaine*.
- [Meurisse et al., 2002] Meurisse, T., Vanbergue, D., and Drogoul, A. (2002). De l'importance des modèles opérationnels dans les approches de simulations individus-centrés. *Cognitive*. soumis.
- [Pietrula et al., 1998] Pietrula, M., Carley, K., and Gasser, L. (1998). *Simulating Organizations*. M.I.T. Press.

Interaction Forte et Interaction Faible dans les Simulations Multi-Agents

Fabien Michel — Abdelkader Gouaïch — Jacques Ferber

*LIRMM Université Montpellier II - CNRS
161, rue Ada - 34392 Montpellier Cedex 5 - France
{fmichel,gouaich,ferber}@lirmm.fr*

RÉSUMÉ. Un des problèmes soulevés par la simulation de systèmes multi-agents (SMA) est celui de leur implémentation sur machine. Il n'existe à l'heure actuelle pas de correspondance entre les modèles que nous décrivons et la manière dont ils doivent être programmés. Notamment, nous étudions les « interactions entre les agents » sans faire référence à leurs implémentations. Dans cet article nous proposons des éléments d'analyse qui permettent de classer les interactions selon deux catégories : les interactions faibles et les interactions fortes. Nous utilisons ici cette distinction dans le but de mieux cerner les besoins techniques nécessaires à une implémentation satisfaisante.

ABSTRACT.

MOTS-CLÉS : SMA, simulation, interaction

KEYWORDS: MAS, simulation, interaction

1. Introduction

Un des problèmes soulevés par la simulation de systèmes multi-agents (SMA) est celui de l'implémentation des interactions entre les entités. En effet, il n'existe à l'heure actuelle pas de correspondance claire entre les interactions du modèle que nous décrivons et la manière dont elles doivent être programmées.

Par ailleurs, il est clair que les résultats d'une simulation sont directement affectés par la technique utilisée pour gérer les interactions [AXT 00, MIC 01b]. Il est donc important de nous donner les moyens pratiques et méthodologiques de préciser la nature de nos modèles théoriques et ainsi mieux appréhender leurs implémentations.

Nous proposons dans cet article des éléments d'analyse qui permettent de classer les interactions en deux catégories : les *interactions faibles* et les *interactions fortes*. Comme nous le verrons, ces catégories font référence à des interactions de nature très différentes qui ne nécessitent pas les mêmes besoins technologiques pour être implémentées de façon *satisfaisante*. Nous défendons ainsi l'idée que cette distinction permet de mieux comprendre la nature de nos modèles et donc de cerner plus précisément leurs implémentations.

Nous rappelons dans un premier temps le principe d'une simulation multi-agents. Nous posons ensuite la problématique de la gestion des interactions. Dans les sections qui suivent, nous définissons les notions clés de notre approche : *interaction forte* et *interaction faible*. Nous montrons ensuite des exemples d'implémentation. Puis avant de conclure nous discutons de l'utilité de notre démarche.

2. Principe de la Simulation Multi-Agents

Dans le cadre de la simulation par ordinateur, l'utilisation du paradigme multi-agents est aujourd'hui une séduisante alternative aux modèles basés sur des équations mathématiques [PAR 98]. Fondée sur l'idée qu'il est possible de représenter de manière informatique les individus, leurs comportements et leurs interactions, la simulation multi-agents a pour objet l'étude, au niveau macroscopique, de systèmes complexes dont la dynamique est

définie, au niveau microscopique, par l'action d'entités autonomes évoluant simultanément dans un environnement commun [RES 95].

Plus concrètement, Σ définissant l'ensemble des états possibles d'un système, toute simulation multi-agents est basée sur l'hypothèse que l'évolution du monde de l'instant t à $t+dt$ résulte de la composition des actions $A_1(t), A_2(t) \dots A_n(t)$ produites par les agents à l'instant t . Autrement dit, il s'agit de construire une fonction du temps, *Dynamique* $D : \Sigma \mapsto \Sigma$, telle que :

$$\sigma(t + dt) = D(\uplus A_i(t), \sigma(t)) \quad [1]$$

Le symbole \uplus désigne ici l'opérateur de composition des actions. Il définit de quelle manière les actions produites à un instant t doivent être composées afin de calculer leurs conséquences sur l'état du monde. Sans entrer dans le détail, il est facile de voir que le calcul correspondant à une telle opération peut s'avérer excessivement complexe étant donné la multitude et la nature des concepts qui peuvent se cacher derrière le mot action (mouvement, prise de décision, consommation d'une ressource).

3. Le Problème de la Dynamique des Interactions

Au contraire des simulations numériques où il existe une correspondance directe entre le modèle théorique et son implémentation¹, un même modèle multi-agents peut être programmé de multiples façons.

La conséquence directe est qu'un seul modèle théorique peut donner des résultats très éloignés suivant la technologie utilisée pour l'implémenter [AXT 00, LAW 00]. C'est pourquoi tous les concepteurs de simulation multi-agents sont amenés à faire un choix personnel en la matière [MIC 01b].

Imputable en partie à l'hétérogénéité des domaines abordés, cet embarras que nous avons à implémenter ces systèmes complexes trouve aussi sa source dans le manque de formalisme permettant de décrire de façon satisfaisante des actions collectives. Plus particulièrement, nous éprouvons une difficulté à modéliser la simultanéité des actions [FER 95]. Alors que,

1. L'ordinateur est dans ce cas uniquement un outil de calcul puissant utilisé pour résoudre des équations numériques clairement définies.

paradoxalement, l'hypothèse selon laquelle les actions des agents sont effectuées de façon concurrente est à la base de l'approche [RES 95].

Par ailleurs, les architectures parallèles (un agent par processeur par exemple) n'apportent pas de solution évidente à ce problème. En effet, une action est généralement modélisée par la modification de variables environnementales. Ainsi, même si les agents se trouvent sur des processeurs différents, les variables environnementales ne peuvent être accédées que de manière séquentielle et les actions des agents ne sont finalement pas véritablement simultanées.

Ainsi, le problème de l'implémentation est principalement lié à l'élaboration d'un mécanisme permettant d'implémenter de façon satisfaisante les interactions. Il ne s'agit pas ici de vérifier si la simulation est représentative de la réalité mais de faire en sorte qu'elle corresponde à la réalité du modèle.

Dans les deux sections suivantes, nous présentons, à partir d'exemples de simulation, les deux types d'interaction que nous avons identifiés.

4. Interaction Forte

4.1. *La Reproduction chez les Agents*

Dans cette section nous allons étudier différentes techniques de simulation utilisées pour modéliser le comportement de reproduction chez les êtres vivants.

Dans [EPS 96] la reproduction est modélisée par une règle comportementale qui peut être résumée ainsi : *Pour chaque voisin, si celui-ci est compatible (fertile et de sexe opposé) un nouvel agent est créé.* La simulation utilise par ailleurs un principe de simulation à *pas de temps constant* qui correspond à l'activation séquentielle de tous les agents comme le montre la figure 1.

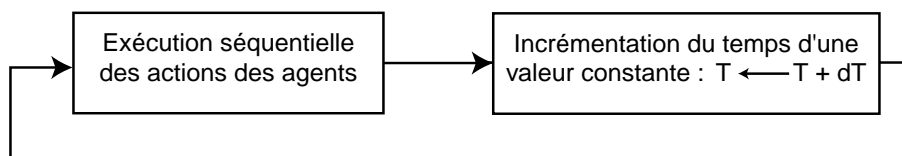


Figure 1. Principe d'une simulation à pas de temps constant.

Cette technique d'implémentation pose cependant un problème. Comme le remarque d'ailleurs eux-mêmes Epstein et Axtell, les agents ainsi simulés peuvent se reproduire plusieurs fois par tour. Si trois agents se trouvent à proximité, il est possible que le premier agent produise une nouvelle entité, puis que le deuxième et le troisième en fassent autant.

C'est sans doute pour cette raison que dans [LAW 00], une période de gestation a été rajoutée. « *We have modified the agent reproduction rule to be more realistic, incorporating a gestation period... If a mate is found (i.e., there is at least one candidate agent), the female agent of the pair becomes pregnant. Throughout the gestation period, neither the male nor the female agent can move or attempt to reproduce* ». De plus les auteurs utilisent une simulation basée sur un principe événementiel (figure 2).

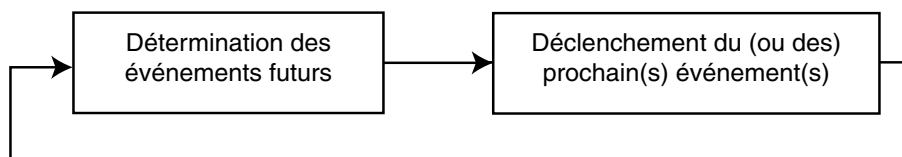


Figure 2. Principe d'une simulation par événements.

Par là, il s'agit de rendre le processus de reproduction plus **réaliste**, pour reprendre le terme de l'article. De plus, il est très intéressant de noter que les auteurs, sur la base d'une implémentation différente, considèrent étudier le même modèle théorique et comparent les résultats obtenus. Leur propos est de montrer que leur technique d'implémentation modélise de façon plus réaliste les systèmes sociaux complexes.

Cependant la méthode employée reste critiquable. En effet, le partenaire choisi n'a pas le choix : le premier ayant décidé pour lui, son comportement, **ses propres buts** ne sont pas pris en compte. Que dire d'un agent qui se déplace pour une raison vitale et qui se retrouve impliqué dans un processus de reproduction qui l'en empêchera.

Ceci est en contradiction avec le principe d'autonomie qui veut qu'un agent ne soit pas sous le contrôle d'un autre [JEN 95]. En effet lorsqu'un agent modifie, directement, en changeant l'état interne d'un autre agent (la variable *pregnant* est mise à vraie) ou, indirectement, en ordonnant à

l'autre de le faire, le caractère autonome de l'agent est perdu. L'approche multi-agents voudrait que l'interaction de reproduction soit le fruit de deux comportements distincts et non le fait d'une seule entité. Sans quoi, le résultat obtenu n'est pas la composition de comportements individuels autonomes et concurrents.

On sent bien ici que l'interaction de reproduction nécessite un modèle de l'action plus évolué. Le modèle *influence/réaction* apporte une réponse en proposant de prendre en compte la simultanéité des comportements [FER 96]. Dans ce modèle un agent produit des influences sur son environnement et non des actions au sens d'une modification directe de l'état du monde. La différence est fondamentale. Une *influence* est une tentative de modifier son environnement (« *je tente de me reproduire* »). L'influence n'est pas directement validée. On prend d'abord en compte les autres influences produites au même instant pour décider, dans un deuxième temps, le résultat de leur composition, ce qui constitue la *réaction* de l'environnement à l'ensemble de ces influences².

Par exemple, si de deux agents, le premier souhaite bouger, on peut poser qu'un comportement de reproduction de la part du deuxième n'entraînera pas de naissance. On ne décide pas à la place des agents mais on décide de la dynamique du système³ [MIC 01a].

4.2. *Définition de l'Interaction Forte*

Une tentative de reproduction n'a de sens que lorsqu'un autre agent compatible est présent à proximité. Le résultat de cette interaction, une naissance, requière la présence d'au moins deux agents dans le système. C'est un comportement dont le but ne peut-être réalisé qu'en conjonction avec un autre agent. Un agent ne se reproduira pas et ne tentera pas de le

2. Il nous faut ici préciser que ce modèle ne correspond pas à un principe de simulation en particulier mais que son objet est de proposer un modèle de l'action qui permet de représenter des actions simultanées, et le résultat de leur composition. Dans le cadre du traitement de la simultanéité, cette procédure se distingue fortement d'une résolution de conflit où toutes les actions sont d'abord validées et où on cherche ensuite à ne pas avoir d'incohérence sur l'état du monde.

3. Dans le modèle *influence / réaction*, les règles d'évolution de l'environnement sont appelées *lois de l'univers*.

faire s'il est seul dans l'environnement. C'est ce que nous appelons une *interaction forte*.

Interaction Forte : des actions agent constituent une *interaction forte* si elles ont pour but un résultat sur l'environnement dont la réalisation **nécessite** la synchronisation de plusieurs comportements.

Ainsi, une *interaction forte* est définie en fonction de la qualité du résultat obtenu sur l'environnement plutôt qu'en définissant la nature des actions qui peuvent l'engendrer⁴.

5. Interaction Faible

5.1. *Le modèle Termites*

Cet exemple de simulation modélise un monde composé de termites (les agents) et de brindilles réparties aléatoirement dans l'environnement. Dans ce modèle, l'ensemble des actions effectuées par les termites est réduit au mouvement et à la manipulation d'un objet. Chaque termite possède un comportement simple qui peut se résumer en deux règles comportementales :

– R1 : « *Si je ne possède pas de brindille, j'en cherche une aléatoirement* »

– R2 : « *Si j'en porte une, je cherche une autre brindille pour la poser à côté* »

La figure 3 montre quatre étapes successives de l'exécution où l'on peut voir qu'il ne reste qu'un seul tas de brindilles après un certain nombre d'itérations. Même si les termites n'interagissent pas directement, elles interagissent à travers l'environnement en déplaçant les brindilles.

Pour tester ce modèle, nous l'avons implémenté selon les deux politiques d'exécution que nous avons présentées dans la section 4 (figure 1 et figure 2). Le résultat obtenu est toujours identique : un seul tas de brindilles

4. Comme nous l'avons dit dans la deuxième partie, beaucoup de concepts peuvent se cacher derrière le mot action et il nous semble difficile, voire impossible, de donner une définition qui englobe l'ensemble des actions que l'on peut trouver dans une simulation de SMA.

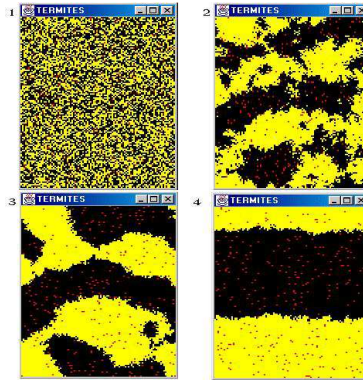


Figure 3. De l'« interaction » des termites émerge un seul tas de brindilles.

est finalement constitué. De plus ce résultat est aussi observé lorsqu'une seule termite se trouve dans l'environnement. Il suffit d'attendre plus longtemps.

Par ailleurs il est intéressant de noter qu'une implémentation de ce modèle selon un principe *influence/réaction* semble difficile à réaliser. En effet, elle consisterait à récupérer l'influence produite par tous les agents à un même instant, tentative de mouvement ou de prise d'un objet, pour ensuite établir le nouvel état du monde. Mais calculer la réaction de l'environnement à de telles influences n'est pas du tout intuitif. C'est une situation qui ne paraît pas *réaliste* et pour laquelle il n'existe pas de solution évidente. En effet, imaginons que ce modèle se retrouve dans la nature *tel quel*, verrait-t-on les termites bouger simultanément sous l'effet d'une horloge virtuelle ? Au contraire le caractère aléatoire des mouvements paraît ici bien plus naturel [HUB 93]. Dans la nature les entités agissent à des instants non corrélés.

Au contraire de l'exemple précédent, les agents n'ont ici pas besoin des autres pour faire aboutir les actions qui sont motivées par leurs buts. Par ailleurs la politique d'exécution choisie n'a pas d'influence sur le résultat final. C'est pourquoi nous identifions ce type d'interaction en tant qu'*interaction faible*.

5.2. Définition de l'Interaction Faible

Le comportement d'une termite n'intègre pas la présence des autres agents. En fait, une termite ne possède pas de telle représentation. Ainsi,

les agents réalisent ici des actions individuelles et non de véritables interactions au sens premier d'*action réciproque*. Autrement dit, les agents ne tentent que des actions qui ne prennent pas en compte l'existence des autres en tant qu'entités capables de réaliser une action complémentaire. C'est pourquoi les agents n'ont pas besoin de synchroniser leurs comportements pour réaliser leurs buts. C'est ce que nous appelons une situation d'*interaction faible*.

Interaction Faible : des actions agent constituent une *interaction faible* si elles ont pour but un résultat sur l'environnement dont la réalisation **ne nécessite pas** la synchronisation de plusieurs comportements.

6. Expérimentations

6.1. Interaction Forte

Nous allons ici étudier le problème de la modélisation de la reproduction dans une version minimale. Considérons deux agents, A et B, compatibles, possédant un comportement simple qui consiste à se reproduire ou à ne rien faire de façon équiprobable.

$$Pr(\text{Agent}_{repro}) = Pr(\text{Agent}_{rien}) = 0.5$$

Nous allons maintenant étudier les résultats obtenus sur un pas de temps de simulation selon trois politiques d'exécution. La première politique est celle utilisée par Epstein et Axtell [EPS 96]. La deuxième correspond à l'implémentation faite par Lawson et Park [LAW 00]. La troisième correspond à l'application du modèle *influence/réaction* telle que nous l'avons implémentée dans [MIC 01a].

comportements	A_{repro}, B_{repro}	A_{repro}, B_{rien}	A_{rien}, B_{repro}	A_{rien}, B_{rien}
naissance(s)	2	1	1	0

Tableau 1. Résultat d'une implémentation inspirée d'Epstein et Axtell

Pour ce premier cas, on obtient une probabilité de 25% d'avoir deux agents, 50% un seul et 25% qu'il n'y en est pas.

comportements	A_{repro}, B_{repro}	A_{repro}, B_{rien}	A_{rien}, B_{repro}	A_{rien}, B_{rien}
naissance(s)	1	1	1	0

Tableau 2. Résultat d'une implémentation inspirée de Lawson et Park

Dans le deuxième cas la probabilité d'une naissance est de 75%. En effet, lorsqu'un agent est sélectionné son comportement n'est plus pris en compte. C'est pourquoi on ne retrouve pas la situation où l'on peut obtenir deux naissances pour un seul pas de temps.

comportements	A_{repro}, B_{repro}	A_{repro}, B_{rien}	A_{rien}, B_{repro}	A_{rien}, B_{rien}
naissance(s)	1	0	0	0

Tableau 3. Résultat d'une implémentation utilisant un mécanisme influence/réaction

Dans le dernier cas, il est nécessaire que les deux agents désirent se reproduire pour créer un nouvel agent. La probabilité d'une naissance est donc de 25%.

On voit ici à quel point la gestion des interactions peut faire diverger les résultats. Toutes ces implémentations correspondent pourtant à l'application d'un seul modèle comportemental. Par ailleurs, un calcul de probabilité simple montre que seul le dernier résultat correspond à l'implémentation correcte de cette interaction. En effet, si on considère des agents **autonomes**, le comportement de A est indépendant de celui de B. Ainsi la probabilité de l'événement *naissance* correspond à une probabilité composée où les événements A_{repro} et B_{repro} sont indépendants :

$$\begin{aligned}
 Pr(naissance) &= Pr(A_{repro}) \text{ et } Pr(B_{repro}) \\
 &= Pr(A_{repro}) \times Pr(B_{repro}) \\
 &= 0.25
 \end{aligned}$$

6.2. Interaction Faible

L'exemple choisi ici, lui aussi minimal, est celui de la consommation d'une unique ressource par deux agents. Chaque agent possède un niveau de vie qu'il lui faut maintenir au dessus d'un seuil en consommant cette ressource. Par ailleurs la ressource se régénère suivant un certain paramètre. Les résultats d'une telle simulation tiennent dans la moyenne du niveau de vie des agents et dans leur espérance de vie.

Encore une fois, nous avons implémenté ce modèle suivant les trois politiques d'exécution précédemment citées. Pour l'application du modèle *influence/réaction* nous avons considéré que si les deux agents accèdent la ressource en même temps, celle-ci est partagée de manière équitable.

Sur un grand nombre de simulations, nous avons fait varier les différents paramètres (épuiement des agents et régénération de la ressource) pour obtenir plusieurs variantes du modèle : compétition pour l'accès à la ressource ou abondance.

Pour chaque situation, nous avons constaté que les résultats obtenus sont identiques quelque soit la politique d'exécution. Il s'agit ici en effet d'une *interaction faible*. Consommer une ressource ne suppose pas de synchronisation des comportements. Cette consommation peut intervenir simultanément mais traiter ou non cette simultanété ne modifie pas l'essence du modèle. Au contraire, une interaction forte n'a de sens que dans la simultanété de deux comportements.

De la même manière une collision entre deux robots est une interaction faible. Pour s'en convaincre il suffit de remarquer que l'espace peut être vu comme une ressource que les agents consomment. Ainsi, que l'on gère les mouvements des deux agents de manière séquentielle ou simultanée, le problème du *réalisme* de l'exécution tient ici dans la granularité des actions considérées⁵ et pas dans la gestion de la simultanété.

7. Discussion

En soulevant la question d'une différence forte entre deux types d'interaction, notre but est de montrer la nécessité de mieux spécifier nos modèles théoriques et leurs implémentations. La distinction *interaction faible/interaction forte* est un pas dans cette direction. A partir des définitions que nous avons données de ces deux notions, nous proposons de les identifier dans nos modèles de la manière suivante. Pour chaque événement qui peut se produire sur le monde (mouvement, naissance, etc.), il convient de vérifier si celui-ci est engendré par l'une ou l'autre de ces

5. Il n'est pas très judicieux de se poser le problème de la simultanété d'une collision entre deux mouvements si l'échelle spatiale choisie est grossière.

deux formes d'interaction. L'implémentation des interactions correspondantes doit alors être considérée en fonction de ce résultat.

Dans un modèle contenant des interactions fortes, l'implémentation utilisée pour les programmer a une grande influence sur les résultats. De plus, elle peut être en contradiction avec le principe d'autonomie décisionnelle des agents et ainsi produire des biais dans le processus de simulation. Nous pensons qu'il s'agit d'un problème crucial qui doit être considéré par la communauté.

Certains travaux utilisent le principe *influence/réaction* pour prendre en compte la synchronisation des comportements et développer de nouveaux langages de simulation comme GLIDER[DAV 00]. D'autres tentent de donner une définition formelle de l'interaction en donnant un rôle plus central à l'environnement [GOU 02]. Cependant ces approches ne sont pas répandues et sont encore en phase de développement. C'est pourquoi il est important que les résultats d'une simulation contenant des *interactions fortes* fassent explicitement référence aux techniques utilisées pour les implémenter.

Au contraire, l'implémentation des *interactions faibles* est beaucoup plus souple dans le sens où l'implémentation *réaliste* des interactions ne repose pas sur des synchronisations de comportements. La gestion des interactions n'a alors que peu d'impact sur le *réalisme* de la simulation et elle ne modifie pas la qualité des résultats observés.

Il est aussi important de noter que ces deux catégories d'interaction ne sont pas incompatibles au sein d'une même simulation⁶. C'est d'ailleurs ce qui est fait dans [CHA 02] pour la simulation de robots autonomes. Dans ce modèle des agents sont chargés de récupérer des objets dont certains nécessitent la force de plusieurs agents. Les mouvements des agents, des *interactions faibles*, sont gérés séquentiellement tandis que le déplacement d'un objet trop lourd nécessite que deux agents poussent en même temps (*interaction forte*). C'est pourquoi cette interaction a été implémentée suivant un principe *influence/réaction* (on fait la somme des forces appliquées par les agents sur les objets pour ensuite décider s'ils se déplacent).

6. Nous avons en général l'habitude de choisir un seul principe de gestion des interactions que nous appliquons à l'ensemble du processus de simulation.

8. Conclusions

Dans cet article nous avons abordé le problème de la correspondance de nos modèles conceptuels avec leurs implémentations. Nous avons vu que l'implémentation est un paramètre important du processus de simulation et qu'il est fondamental de l'intégrer dans la phase d'analyse du modèle. Dans ce cadre, nous avons proposé de faire une distinction explicite entre deux classes d'interaction : *interaction forte* et *interaction faible*. Nous pensons qu'une telle approche permet de mieux comprendre nos modèles et leurs implémentations.

Dans un deuxième temps, cette distinction met en évidence le fait que les interactions que nous avons appelées *interactions fortes* nécessitent l'utilisation d'un modèle de l'action qui modélise la synchronisation des comportements. Il s'agit de respecter le principe d'autonomie des agents tout en assurant que l'évolution du système résulte de l'ensemble des comportements individuels.

Même si ces notions peuvent paraître incomplètes ou insuffisantes, nous avons surtout voulu soulever la question de l'utilité d'une telle démarche. Il est en effet essentiel pour la communauté multi-agents de mieux spécifier le processus de simulation. Et ce, d'une part sur un plan conceptuel : quelle est la nature profonde du modèle ; et d'autre part d'un point de vue technique : comment implémenter le processus de simulation correspondant de manière satisfaisante.

9. Bibliographie

- [AXT 00] AXTELL R. L., « Effects of Interaction Topology and Activation Regime in Several Multi-Agent Systems », *Proceedings of the 2nd Workshop on Modelling Agent Based Systems, MABS'00*, LNAI 1979, July 2000.
- [CHA 02] CHAPPELLE J., SIMONIN O., FERBER J., « How Situated Agents can Learn to Cooperate by Monitoring their Neighbors' Satisfaction », *Proceedings of the 15th European Conference on Artificial Intelligence ECAI'2002*, Lyon France, July 21-26 2002.
- [DAV 00] DAVILA J., TUCCI K., « Towards a Logic-Based, Multi-Agent Simulation Theory », 2000.
- [EPS 96] EPSTEIN J. M., AXTELL R. L., *Growing Artificial Societies*, Brookings Institution Press, Washington D.C., 1996.
- [FER 95] FERBER J., « *Les systèmes multi-agents, vers une intelligence collective* », chapitre 2, p. 399-411, Interéditions, 1995.

- [FER 96] FERBER J., MÜLLER J.-P., « Influences and Reactions : A Model of Situated Multiagent Systems », *Proceedings of the 2nd International Conference on Multi-Agent Systems, ICMAS' 96*, 1996, p. 72-79.
- [GOU 02] GOUAÏCH A., GUIRAUD Y., « {Movement, Interaction, Calculus}* : an algebraic environment for distributed and mobile calculus », *first international NAISO congress on autonomous intelligent systems*, Waterfront Campus, Geelong, Australia, February 2002, Deakin University.
- [HUB 93] HUBERMAN B., GLANCE N. S., « Evolutionary Games and Computer Simulations », *Proceedings of the National Academy of Science USA*, p. 7716-7718, August 1993.
- [JEN 95] JENNINGS N. R., WOOLDRIDGE M., « Intelligent agents : theory and practice », *The Knowledge Engineering Review*, vol. 10, n° 2, 1995, p. 115-152.
- [LAW 00] LAWSON B. G., PARK S., « Asynchronous Time Evolution in an Artificial Society Mode », *Journal of Artificial Societies and Social Simulation, JASSS*, vol. 3, n° 1, 2000.
- [MIC 01a] MICHEL F., « Le modèle Influence / Réaction pour la Simulation Multi-Agents », CHAIB-DRAA B., ENJALBERT P., Eds., *Actes des 1^{res} Journées Francophones des Modèles Formels de l'Interaction, MFI' 01*, vol. 3, Toulouse, 21-23 Mai 2001, p. 391-406.
- [MIC 01b] MICHEL F., FERBER J., GUTKNECHT O., « Generic Simulation Tools Based on MAS Organization », *Proceedings of the 10th European Workshop on Modelling Autonomous Agents in a Multi Agent World MAMA AW'2001*, Annecy, France, 2-4 May 2001.
- [PAR 98] PARUNAK H. V. D., SAVIT R., RIOLO R. L., « Agent-Based Modeling vs. Equation-Based Modeling : A Case Study and Users' Guide », *Proceedings of the 1st Workshop on Modelling Agent Based Systems, MABS'98*, Paris, France, 1998.
- [RES 95] RESNICK M., « New Paradigms for Computing, new Paradigms for Thinking », DISESSA A., HOYLES C., NOSS R., Eds., *Computers and Exploratory Learning*, Springer-Verlag, 1995.

La simulation en physique

Pasquale Nardone
Service de Physique Générale
Université Libre de Bruxelles

Il faut comme physicien et chaque fois que l'opportunité se présente, essayer de réfléchir sur le processus même de construction du savoir. Se poser des questions sur tout ce que le physicien utilise : les outils mathématiques, évidemment, mais aussi sur les méthodes pratiquées ou sur la genèse de l'emboîtement des idées ou encore sur les modèles, entre autres. Le but nécessaire consiste à apporter un éclairage particulier, qui viendrait des coulisses en quelque sorte, sur la physique et donc sur le métier du physicien.

La simulation est un de ces outils, on doit donc se demander : que cache-t-elle ?

Description

Pour la comprendre essayons de décortiquer les éléments qui la composent. Nous pouvons identifier trois étapes :

- il faut choisir une « représentation de la nature »
- il faut choisir un langage de description
- il faut choisir une interprétation

En bien y réfléchir, ces 3 étapes ne sont ni séquentielles, ni uniques, ni vraiment distinctes mais pourtant de façon systématique elles apparaissent. Elles s'emboîtent récursivement et agissent l'une sur l'autre.

Représentation \diamond langage \diamond interprétation

Essayons de comprendre pourquoi ces trois étapes me semblent importantes en illustrant ces propos au travers des exemples.

D'abord rappelons la finalité objective. On ne se trompe pas en disant que la simulation sert avant tout à la prédiction du comportement d'un objet réel sous analyse. Les physiciens y ajouteraient volontiers une dimension : la simulation permet aussi de tester des « paramètres » sur cet objet (j'étends la notion de « paramètre » à l'ensemble des données qui touchent à la modélisation). Le sous-entendu important, voire essentiel si on se rappelle que la physique est une science expérimentale, c'est que souvent l'objet sous analyse ne peut pas entrer dans un laboratoire pour y être mis en « expérimentation ». Cela signifie aussi que les paramètres modifiables en simulation ne le sont évidemment pas « réellement ». Songeons à la simulation des tremblements de terre, aux courants marins dans les océans et leurs interactions complexes avec l'atmosphère pour la détermination de la météo ; on pense aussi à la dynamique stellaire qui va déterminer la « vie » d'une étoile ; ou encore à toutes les simulations d'objets techniques : de la voiture, à la

centrale nucléaire.

□

▣ Dès lors, la question qui doit se poser, comme physicien mais aussi comme citoyen, est la question de confiance : peut-on porter crédit aux résultats d'une simulation ? Soit pour modifier un comportement technique : renforcer ici, solidifier cela ; soit pour changer une attitude sociale : arrêter telle pollution, modifier la circulation routière, changer la couleur des paquets de pâtes ...

▣ En annexe à la question de confiance, la question du « comment » apparaît alors : comment la simulation reproduit-elle la "réalité" soumise à l'expérience ? Je dis "reproduit-elle la réalité" alors que je pouvais dire "simule la réalité".

▣ Car, en effet, chaque étape va nécessiter une mise en représentation de ce réel tant convoité. □ A chaque étape il faudra bien "comprendre" ce que le physicien fait pour qu'en fin de compte, on puisse s'assurer que les résultats obtenus sur le "simulacre" peuvent être valables c'est-à-dire comparables au réel !

C'est en pensant à cette adéquation entre « réel » et « simulation » que ces trois étapes se dégagent. Elles induisent, sans que le physicien ne le veuille parfois, une rupture nette entre le réel et la description de ce réel.

▣ faut nécessairement réfléchir à ces points de possibles ruptures car, de fait, le modèle et sa simulation vont parfois prendre tellement de place, que ce soit dans le débat scientifique ou dans le débat politique (OGM ou pollution), qu'ils vont usurper le discours sur le vrai en lieu et place de l'expérience.

▣ Prenons les simulations de dynamique atomiques ou moléculaires classiques. Il faut choisir une représentation : les atomes sont des points dans l'espace-temps. C'est la localisation de ces atomes que l'on va prendre comme objet de description de ces atomes. Déjà là, il peut y avoir une restriction la position dans l'espace est-elle la seule caractéristique pertinente pour le problème. On prend aussi la vitesse de ces atomes et sa représentation : un vecteur. La physique va donner en plus les « forces » entre ces points - atomes. Le choix de représentation va abandonner nécessairement des effets physiques : pas de rotation par exemple, et un choix de modèle physique : la mécanique quantique ne peut pas se contenter de cette représentation.

▣ On ne peut pas s'arrêter là car la simulation va devoir passer par la manipulation de ces données : la position et la vitesse, il faudra calculer. Un choix de langage va s'imposer : une algèbre et des équations différentielles pour décrire la physique du comportement. Mais tant l'algèbre classique que les équations différentielles ne sont pas compatibles avec l'informatisation de ce calcul. Il faudra donc modifier l'algèbre et les lois de la physique à cause du choix de la représentation et de sa « réalisation » sur ordinateur. Sans entrer ici dans le détail, on y reviendra plus tard, l'informatisation numérique contraint tous les processus physiques à une discrétisation forcée. La position doit être un nombre entier (positif) et borné supérieurement par la taille des nombres manipulables par la machine. Le mouvement doit se faire nécessairement sur cette grille. Enfin, le langage va même modifier la dynamique temporelle puisque jamais une équation différentielle ne peut être calculée numériquement, elle doit aussi être discrétisée.

▣ La représentation et le langage vont donc obligatoirement opérer un basculement

du monde « réel » vers un monde qui, lui, est spécifique à la simulation. Il faudra faire un travail préalable, souvent considérable, pour établir un lexique, un dictionnaire et une grammaire, rendant possible le passage d'un monde à l'autre. Il faut néanmoins savoir, dès le début, qu'il existera des mots impossibles à transposer d'un monde à l'autre. La discrétisation par exemple va engendrer une simulation tellement « rectangulaire » qu'il n'y aura pas de place pour des questions qui touchent aux symétries par exemple.

□

Sous couvert de positionner les atomes, on voit bien l'impact de la représentation visuelle et du langage qui habillent le « réel » de telle façon que l'on ne le reconnaîtra plus. La question est évidemment : "on simule quoi en fait ? ". La question peut être posée autrement : "quelle transformation la simulation opère-t-elle sur le réel ? ". La question peut aussi être adoucie par le constat que la simulation parle d'autre chose que de la chose qu'elle prétend simuler et devenir : "peut-on contrôler les effets de la simulation ? ".

Nous aborderons au travers d'autres exemples les problèmes spécifiques à ces trois étapes en essayant d'apporter un éclairage sur le processus complexe de simulation sur ses limitations et ses effets.

La simulation □ vers une épistémologie du dialogue interactif

Pasquale Nardone, Université Libre de Bruxelles, Physique Générale CP 231, Sciences-Physique-Agrégation, Bd. du Triomphe, 2 1050 Bruxelles, Belgique et

Françoise Decortis, Université de Liège, Faculté de Psychologie et des Sciences de l'Éducation, 5, Bd. du Rectorat, 4000 Liège, Belgique

La psychologie, les sciences sociales déploient une panoplie de cadres théoriques et de méthodes en vue de fournir une description et une analyse des phénomènes observés et ceci vaut tant pour les situations de coopération présentes dans nombre de situations de travail, éducatives voire même ludiques. La dimension non déterministe de ces situations est cependant peu explorée et les prédictions que nous pouvons en faire sont limitées.

Le paradigme de complexité, créé par la modélisation en physique, est basé sur une description détaillée des interactions entre les éléments du système (souvent appelé les agents), et entre le système et son environnement plutôt que sur une description purement fonctionnelle des modules dans l'abstrait de son rapport avec le monde externe.

Appliquée aux sciences sociales, elle peut nous conduire vers des perspectives nouvelles où des modèles psycho-sociaux seront davantage orientés vers la prévision que l'explication. Ceci pourrait être une évolution très positive dans la mesure où, nous pourrions mieux articuler les besoins de la science et de l'ingénierie sociale. Cette approche fournit une occasion d'examiner les interrelations entre études de terrain et recherche en sciences sociale et cognitive. Ceux-ci peuvent être de plus en plus orientés vers des modèles plus rigoureux et potentiellement plus prédictifs de la conduite humaine.

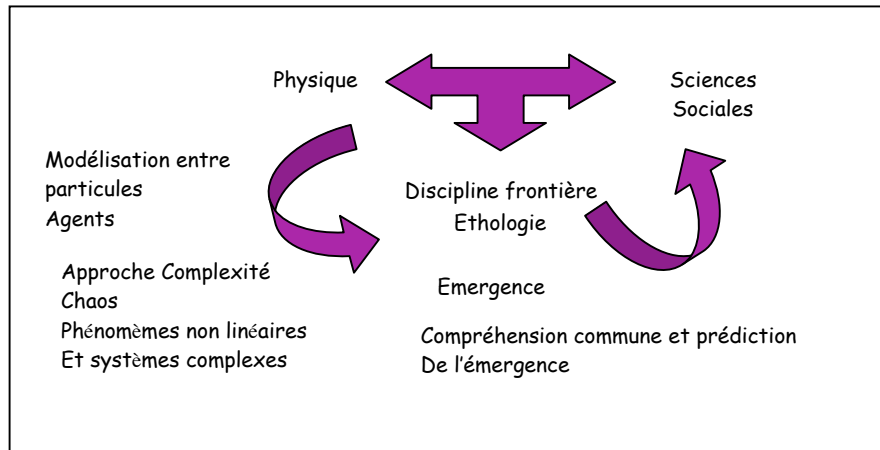
A la frontière entre les sciences sociales et la physique, nous allons mettre en place une approche pluridisciplinaire visant à comprendre et modéliser des processus cognitifs et sociaux dans des contextes naturels en essayant, par exemple, de répondre à la question : comment de simples agents en interaction produisent-ils des comportements collectifs complexes.

Notre objectif est d'une part de produire des descriptions détaillées d'interactions locales et de comprendre les mécanismes par lesquels ces interactions génèrent un comportement global.

Comme point de départ, nous avons pris une situation de référence que nous avons appelé le «*cooperative demixing*». D'autre part, nous visons à développer des modèles de l'activité basés sur l'observation du comportement des agents et d'extraire de ces modèles des mécanismes que nous pouvons exploiter en vue de simuler le comportement de ces agents en interaction. Dans une phase d'évaluation, nous observons le comportement simulé en regard de la situation initiale et examinons dans quelle mesure des règles définies dans la simulation sont appropriées ou devraient être ré-examinées. La situation de référence est une classe d'enfants âgés de sept à huit ans dont la tâche est de coopérer tout en cherchant des mécanismes d'adaptation à leur environnement.

Ainsi du point de vue de la psychologie, notre orientation est de s'inspirer des modèles de la physique et des modèles de l'éthologie pour envisager s'ils peuvent contribuer à enrichir nos paradigmes et notamment nous «*parler*» de l'émergence et des comportements collectifs complexes. C'est également à l'issue de l'*exercice* de tendre vers une compréhension commune et une prédiction de l'émergence. C'est d'envisager si la simulation peut nous aider à faire de meilleures prédictions ou, le cas échéant, à définir ce qui pourrait nous y conduire.

Enfin, la simulation nous questionnera sur la création de définitions «*expérimentables*» ou «*pragmatiques*» (dans le sens algorithmique) des concepts de sciences humaines.



Que couvre ici la simulation?

Une zone frontière: l'éthologie et la modélisation des phénomènes non linéaires

De façon à trouver une «*zone frontière*» où le dialogue puisse se construire nous nous tournons vers l'éthologie et sa modélisation comme la propose les physiciens qui traitent des phénomènes non linéaires et des systèmes complexes du monde animal. En effet, les modèles portant notamment sur l'agrégation d'insectes sociaux (fourmis ou blattes) permettent déjà de «*comprendre*» différents comportements sociaux plus ou moins complexes. La modélisation a donc été transférée d'un univers à un autre, de la physique à l'éthologie avec un «*bonheur*» prédictif inattendu. Pouvons-nous proposer encore un saut de l'éthologie aux sciences sociales. L'agrégation a été transposée aux

problèmes de transport urbain, par exemple, alors que nous envisageons d'analyser, à la lumière de la simulation, un comportement de jeu dans des classes d'enfant. Le jeu va nous servir de «laboratoire» de comportement, la simulation va-t-elle nous indiquer le caractère prédictif du comportement social? Pour autant qu'on puisse le définir d'ailleurs!

La construction d'un langage mutuel partagé

Quels sont les usages de la simulation? Nous faisons un usage heuristique de la simulation comme aide à la découverte scientifique.

Nous tentons de montrer l'influence réciproque entre les deux disciplines. Les observations fournissent un corpus de donnée et un niveau de description, à partir de laquelle on extrait les mécanismes qui pourraient être représentés par des algorithmes. La simulation produit une nouvelle description qui crée un terrain d'échanges. L'interprétation que chacun fait de sa propre réalité – la façon dont il la communique à l'autre, - qui en découle et le retour permettent de construire des concepts communs et de créer un langage mutuellement partagé.

La simulation change la façon de regarder et de parler de nos «problèmes» spécifiques et par là modifie nos paradigmes respectifs. La simulation a alors une valeur heuristique permettant de procéder dans nos disciplines respectives à des découpages qui tendent à se fondre.

Au cours du séminaire nous développerons ces questions en les illustrant par l'exemple d'un jeu d'enfants que nous observons et modélisons.

Simulation for urban system modelling

La simulation pour la modélisation des systèmes urbains

Sylvie Occelli

IRES - Istituto di Ricerche Economico Sociali del Piemonte, Via Nizza 18,
10125 Turin, Italy (Tel. ++39/11/6666462, e-mail: occelli@ires.piemonte.it)

ABSTRACT

Since the early developments of the modelling field in the late '50, simulation has provided an important support for dealing with the dynamics of urban systems. Recently, the field is undergoing deep changes. These are related to what has been called the structural - cognitive shift in modelling, which involves the aims, contents and role of the modelling activity. As a result, a new role of modelling as a cognitive mediator is established between the abstraction process underlying a modelling activity and the external domain in which this activity takes place. This also affects the very status of simulation.

This note discusses this shift and tries to highlight some implications as far as simulation is concerned.

KEY WORDS: modelling activity, modelling as a cognitive mediator, urban complexity, simulation and modelling.

RÉSUMÉ

Depuis ses origines dans les années '50, la simulation a représenté une dimension importante dans la modélisation des systèmes urbains. Récemment, des changements importants se sont produits dans le domaine. Ceux-ci tiennent à un déplacement de la perspective de modélisation, d'une perspective "structurale", à une nouvelle que nous appelons "cognitive" (le *structural /cognitive shift*). Une conséquence de ce déplacement relève spécifiquement du nouveau rôle de la modélisation en tant que *médiateur cognitif* entre les processus d'abstraction propres à une activité de modélisation et l'environnement dans lequel elle se place. Cette note se propose de discuter les implications de ce déplacement pour la simulation.

MOTS-CLÉS : activité de modélisation, complexité urbaine, modélisation, modélisation comme médiateur cognitif, modélisation et simulation

Paper prepared for les Journées de Rochebrune 2003 'Le statut épistémologique de la simulation'.

1. Introduction

Simulation means something quite different depending on whether it is used. In the scientific context, in fact, simulation is a particular form of modelling that consists in reproducing, typically by means of a computer, the functioning of a system; it therefore involves the activity of knowing. In an ordinary sense simulation implies dissimulation, pretence, make-believe (Dupuy, 2000, p.40).

In geography, simulation has been intrinsically associated with the modelling of urban systems. Since the early developments of the field in the late fifties, simulation has provided an important support to deal with the dynamics of urban phenomena. As the urban modelling field is undergoing deep changes also the role and sense of simulation are changing.

We argue that these changes are primarily related to what has been called the structural -cognitive shift in modelling, which involves the drives, contents and role of the modelling activity. A most noticeable aspect in this shift is that modelling acts *as a cognitive mediator* between the components of an abstraction process underlying modelling and those of the external environment, which a modelling activity belongs to.

In this shift the very status of simulation is affected.

In the following we will comment on some recent works (Occelli, 2000, 2001a,b) dealing with this structural-cognitive shift in modelling and emphasize its consequences as far as simulation is concerned. In the discussion some references to the modelling experiences carried out at Ires will also be made. It is worth noting that our arguments are by no means conclusive as they reflect a critical reflection about the modelling of spatial phenomena, which is still in progress.

The discussion is organized into two main parts. Section 2 recalls the major aspects of the structural-cognitive shift in the modelling of urban phenomena and discusses the relevant aspects of modelling as a cognitive mediator. In section 3 an effort is made to point out some

major implications as far as simulation is concerned. Some general remarks conclude the paper.

2. Modelling as a cognitive mediator

Several changes in the epistemological, operational and socio-cultural contexts are deeply influencing the whole field of geography and urban modelling¹ (for a discussion see Batty, 1994, Wegener, 1994). These can be related to what has been called the structural-cognitive shift, which calls for a broader view of the very concept of modelling (Occelli, 2001a,b, Occelli and Rabino, 2000a, 200b):

- From a view according to which modelling is an activity through which an understanding of the organizational structure of an urban system is obtained (the *structural perspective*). The model is a (simplified) representation of certain urban phenomena and of their changes to exogenous or controlled induced perturbations;
- To a view in which modelling is an activity for testing, exploring, creating and communicating knowledge about certain urban phenomena (the *cognitive perspective*). Models therefore are means for representing the working of our knowledge hypotheses (and of their outcome).

Whereas the first view belongs to the two classical approaches underlying model development in science (i.e. the realistic approach aimed to give substance, credibility and truthfulness to the observations of the real world and the axiomatic approach allowing us to set up consistent analytic frameworks), the second can be related the constructivist approach,

¹ Complexity issues are also an encompassing important source of change. Their acknowledgement impacted on urban modelling in several ways (Occelli, 2001a):

- First, on a substantial ground it helped to recognize certain system behaviours, which looked counterintuitive or difficult to be clearly stated even at a conceptual level.
- Second, on a methodological ground it exposed the question of the relationships between the ontological and epistemological dimensions underlying the analysis of urban problems (i.e. the double faced statement: complexity is an intrinsic feature of phenomena and complexity depends on the knowledge of an observer).
- Third it contributed to shake the once compact urban modellers' community.
- Finally, it raised a need to explore the different ways of deployment of interacting behaviours, disclosed new horizons for modelling, (i.e. the researches in artificial life and artificial society).

according to which modelling is used to uncover interpretive keys for problem definitions (Pidd, 1996).

The structural-cognitive shift affects the scope, role and functions of a modelling activity, influencing its two fundamental loops, i.e. the internal loop (modelling process) concerning the conventional steps underlying a process of abstraction and the external loop (modelling domain) representing the general context of modelling (Occelli, 2002).

In addition, modelling does not limit itself to the internal loop but involves to a greater extent the components of the external loop. As a result, the connections between the modelling process (internal loop) and modelling domain (external loop) are not centred only on the observable but involve several components of both loops, although in a different ways. The model, therefore, is an interface between the two loops. It provides the means to reinforce, better articulate and make clearer their inter-relationships. Hence the model plays a role of cognitive mediator between the two loops, see Figure 1².

To support this claim a number of reasons can be advocated which entail issues of cognition, knowledge epistemology and consciousness (Occelli, 2001, 2002)³.

² Both loops are centered on the *observable*, the phenomena in the geographical world, which are subject to investigation. The lower loop, called internal, refers to the conventional steps underlying a process of abstraction. This has its roots in the positivistic assumptions held in the mainstream of social sciences. It proceeds from observation to the formulation of concepts and more formal models of it (the so called *encoding process*), and terminates referring back these latter to the observed reality (through the so called *decoding process*).

The upper (external) loop refers to the historical and socio-cultural domain in which the process of abstraction occurs. It reminds us that modelling activity has to confront itself with the urban issues it aims to address, as well as with the socio-cultural context in which it is developed (Occelli, 2001a).

³ In the field of cognitive sciences, in particular, one major contribution to this argument concerns the relationships between the contrasting approaches of naturalistic explanation of mind and hermeneutic understanding of meaning (see, Havelange, 1998) are crucial. Related research questions concern: a) the formulation of an objective approach to the question of mind, able to overcome the axiomatic features of mathematical formalization, b) the recent developments in the hermeneutic approach and c) the centrality of the technical mediation.

As far as the epistemological debate is concerned, a relevant theme is the need to reconcile contrasting approaches conventionally held in relating human experience and the external world, i.e. the subjectivist's in which what matters is the individual subject

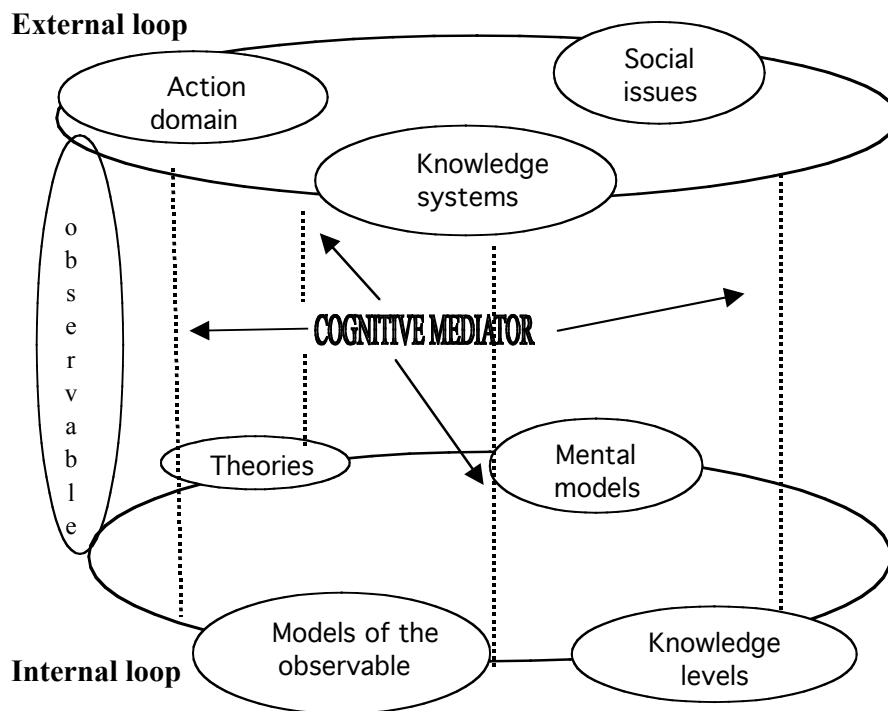


Figure 1 Modelling as a cognitive mediator

The very notion of model and the knowledge gain derived from a modelling activity are important aspects of modelling as a cognitive mediator.

and its experience and the objectivist's in which a world reality is postulated which is observer-independent. A major implication of the structural-cognitive shift, is that to undertake a modelling activity one has to make explicit the main dimensions of the analytic enquiry, one has to be involved in the encoding and decoding processes:

- *The degree of explanation* we expect to achieve by means of a modelling activity i.e. the level of insights or knowledge level we (as analysts or urban system experts) should be satisfied with. Both the holism/ reductionism and predictable/ unpredictable dualisms are involved in this dimension.
- *The kind of system structure* we refer to in our investigation, that is the kind of degree of control on the actors' decisions we build into the model, i.e. the control mechanisms underlying market and state regimes, the interactions occurring between micro and macro levels.

Finally, the recent debate on consciousness brings to the fore a number of questions which are particularly relevant in a modelling activity, i.e. the relationships between the subjective and objective, the reference to values, beliefs, ethical judgements, social and moral norms.

a) What should be retained as a generally accepted notion of model is elusive and largely disputable. The general definition recalled in Dupuy (2000, p.29) may be a useful reference: ‘A model is an idealization (usually formalized in mathematical terms), that synthesizes a system of relations among ‘elements whose identity and even nature, are up to a certain point a matter of indifference, and which can, as a result, be changed, replaced by other elements or, without (the model’s) being altered’. Building on this definition several features⁴ can be exposed, which in the structural perspective to modelling focus either on the syntactic procedure, i.e. the model as an analytical device to study the city, or on the relevant representation of urban phenomena, i.e. the model as a simplified but meaningful description of a city.

Modelling as a cognitive mediator entails both. Whereas the issues of the complexity of cities and their evolution have been widely acknowledged, modelling developments have concentrated mostly on methodological issues (see Bertuglia, Bianchi and Mela eds. 1998). That a (mathematical and /or a computer) model describing a complex system like a city is itself a human artefact, a *natural* object having its own complexities⁵ has been largely gone unnoticed.

b) The acknowledgment that a model is a ‘complex object’ raises a need to question the kind of knowledge to be expected or gained from it. Several aspects may be identified which are related to two major dimensions of the activity of cognitive mediation (Occelli, 2002).

- A first one, which we will call *action oriented*, stems directly from the issues in the mainstream of the complexity studies. As Cowan and Pines (1994) put it: “Achieving comprehensive “stereoscopic” views of most complex systems usually demands that they be described in more than three dimensions...”(p. 710). Adopting a

⁴ Some of these features for example emphasize that a model is:

- an abstract form, which is instantiated by phenomena;
- an equivalence class establishing equivalence relation among domains of phenomenal reality;
- an abstract form, which enjoys a transcendent position.

⁵ As observed in Dupuy (2000), the work of Turing and Godel showed that also for mathematical entities we had to renounce to a notion of genetic definition, i.e. we had to give up the idea that all the properties of an object can be derived from its definition.

cognitive mediation perspective, therefore, entails to consider a multiplicity of views of the urban phenomena in a coordinated way. Such an approach involves what Zeleny (1996) has indicated as “relating descriptions of objects into coherent complexes. The relationships among objects are not simply out there to be captured, but are being continually constructed and reconstructed and re-established by the knower” (p.212)⁶. This endeavour also implies a change of focus in the function of the modelling activity, from the analytical/procedural versus explorative/ cognitive approach.

- A second dimension, which we will call *meaning oriented*, reflects a need to reconcile those contrasting views conventionally held when relating human experience and the external worlds, i.e. subjective and objective approach, tacit and explicit knowledge, local and global knowledge, hard and soft sciences, common sense and scientific knowledge^{7,8}. Meaning is obtained through a process of learning, in which knowledge of cities is permanently fuelled and opened to confrontation and critical revision. Several representations of urban phenomena can be derived, updated and progressively enriched. Modelling as *a cognitive mediator* means

⁶ When considering the *internal loop* of the modelling process (see, Fig.1), this action oriented feature, for example, gives us the possibility to reverse the conventional direction of the abstraction process, i.e. moving anti-clockwise, from the observable to system models, mental models then theories. As a result, one major focus of modelling becomes the shared representations of the observable. In this respect, experimentation made possible by models plays a crucial role in connecting system models, individual mental representations and theories. Theories lose their unique role of “depository” of scientific truths, guiding the formation of individuals’ mental models. They acquire a more pragmatic role, as means for validating models. In mental models, in addition, greater attention is given to awareness and consciousness. As they become more orientated at “cognition”, models (of the observable) are necessary means for exploring alternative courses of action, adjusting them and assessing their viability (Occelli, 2000).

⁷ Underlying this need are several facts, which are mainly relevant in the external loop of the modelling activity (Occelli and Rabino, 1999a), i.e. the increasing complexity of the policy making context, the changing role of the observer, and a greater awareness of the importance of experience and learning in individuals’ courses of life.

⁸ To some extent, this advocacy about the potentials of cognitive mediation underlying a modelling activity, parallels the emphasis given in the analysis of cognitive strategies on processes called conceptual blending, i.e. a bridge from abstract models and more tangible material embodiments of cultural models (Hutchins, 1998).

that in order to achieve a shared representations of the observable, shared form-meaning pairs (i.e. a language) are also required. Language is an essential mechanism to both distinguish between relevant objects in an environment and “coordinate our action in a social domain” (Zeleny, 1996, p. 212).

3. Simulation and modelling

To illustrate the role of simulation and its novel features as far as the role of cognitive mediation in urban modelling is concerned we will refer to the modelling experience carried out at Ires (Occelli and Landini, 2002). On the basis the drives underlying their use for socio-economic studies, we can identify three types of model, see Fig. 2.

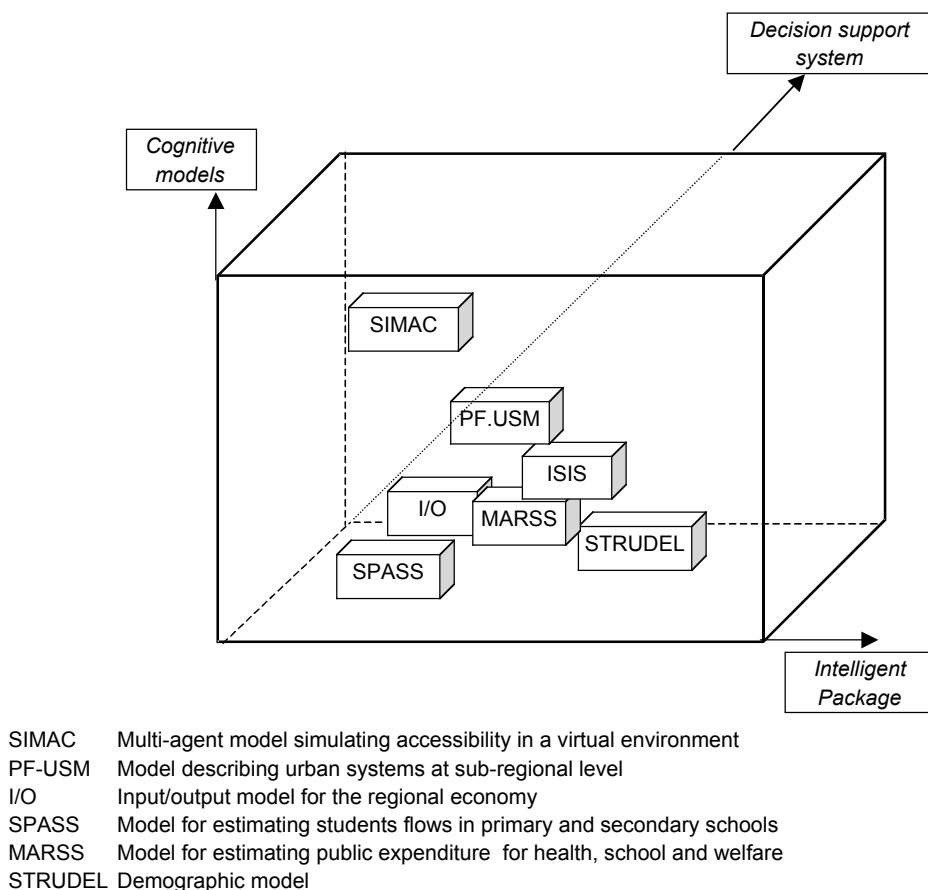


Figure 2 A classification of the models used at Ires

These can be viewed as reflecting a kind of progressive transformation from a structural (intelligent packages) to a cognitive (cognitive models) perspective to modelling.

Table 1 summarizes the main features of the model profiles, considering as descriptive keys the steps in the modelling loops shown in Fig.1. In Table 2 an effort is made to distinguish the role of simulation for the three model types⁹. These can be briefly outlined as follows:

- Intelligent packages: they address specific well-defined urban questions. They exploit consolidated modelling methodologies, which thank to the advances in information and communication technologies are being incorporated in user friendly packages, and diffused to a large public. The structural perspective to modelling largely predominates. Simulation is mainly restricted to the internal loop. It plays a major role as an analytic dimension supporting algorithmic procedures and making it possible the operational implementation of the model.
- Decision support systems: they are primarily aimed at assisting analysts for policy making. Both the structural and cognitive modelling perspectives are involved although to a various extent. In particular, a ‘what if’ perspective is adopted, where attention is turned not just on the ‘what’ but on the ‘if’. They typically are hybrid systems integrating three kinds of components: a core system describing the urban structure, an information component for data retrieval and output evaluation and a graphical interface for output visualization. In these system models the role of simulation is not limited to the internal functioning of a component but, because of the ‘what if perspective’, a set of links with the model external domain are established, although mainly associated with the kind of technological backcloth characterizing the information system architecture.
- Cognitive models: the knowledge of human decision making and action in an uncertain and changing environment is the main

⁹ Implicit in our discussion is the fact that simulation is computer-based, and requires certain resources: a computing interface, a software program, a set of data and a certain level of technical and analytical expertise. Notwithstanding their relevance in influencing the current potentialities of simulation for urban modeling, these topics are not dealt with here.

purpose of these models. As could be expected, the cognitive perspective to modelling predominates. As a result, the role of cognitive mediation of models acts both as an activator of simulation potentials and a recipient of these latter. To some extent, the novel features of simulation, apart from those made available from progress in computation and information science, are co-determined by the cognitive mediation role. Our previous arguments about the notion of model and knowledge gain from a modelling activity are taken to the fore.

Table 1 Profiles of the types of model used at Ires

	Intelligent Package	Decision Support System	Cognitive model
<i>Socially relevant geographical phenomena</i>	Urban costs and benefits	Efficiency and effectiveness of urban dynamics	Human decision making in a spatial environment and formation of collectives
<i>Action domain</i>	Geographical variables to be used as a leverage for change	Reasoning about socio-economic scenarios in a spatial framework	Awareness of action spaces in spatial environment
<i>Observable</i>	City as a mix of urban functions	City as a system of interacting activities	City as a self-organized system, resulting from the interaction of autonomous cognitive agents
<i>Abstractions (theoretical bases)</i>	Spatial equilibrium and utility maximisation approaches	Integration of input-output and spatial interaction approaches in a multi-level framework	Activity space of agents in a time-space framework, complexity approach
<i>Mental models</i>	NA	Implicitly included	Included
<i>Knowledge levels(*)</i>	Low granularity and high formalization	Medium granularity and medium formalization	High granularity, low formalization
<i>Model of the observable</i>	Regional system model, urban sector partial equilibrium models	Stock-flows models, operational urban system models	Multi-agent models of spatial movements and behaviour in an artificial environment

(*) Definition based on Moss (1999)

As far as the extension in the notion of model is concerned two aspects are worth being emphasized:

Table 2 Role of simulation in the various types of models

	Intelligent Package	Decision Support System	Cognitive model
External loop (model external domain)	Urban problem solvers	Analytic device to assist decision-making for impact analysis, geographical data management and visualization	Duplication in an artificial environment of spatial human behaviours observed in a real environment
Internal loop (abstraction process)	Technical feature underlying the software program	Algorithmic procedures to deal with the 'what if' questions	A way to reproduce the unfolding over time of individuals' action spaces
Connections between the internal and external loops	Those established by the analyst (the expert)	Information links defined by the architecture of the information system given the current communication and computer technology	They can be manifold relationships: expert/general public, decision-makers/citizens, scientific knowledge/folk knowledge

1. If we recognise that a model of an urban system is *a natural object* (i.e. a human artefact), then to know it one has to turn to experimentation. But, in order to make experiment on it (i.e. to observe the causal-effect relationships), we have to *duplicate it in a computer*, through simulation.
2. If, in addition, we posit that a model of an urban system is *a complex object* then in order to describe it we cannot simply describe its behaviour but we have to account for its structure (Dupuy, 2000). Namely, we have to define its organization and functioning laws the deployment of which allows us to observe the features of the urban behaviour we are interested in as this unfolds over time. Simulation makes it possible to carry out this task. The recent developments of simulation in the geographical field and more generally in the social sciences can be primarily associated to this endeavour (see Ballot and Weisbuch eds. 2000, Conte, Hegselmann and Terna, 1997, Couclelis, 1998, Gilbert, 2000,

Gilbert and Troitzsch, 1999). In this respect, simulation can be defined as a ‘deductive – generative’ (Epstein, 1999). These potentials of simulations are being acknowledged also in the policy making context, where, because of the increasing complexity, it gives the possibility to develop ‘an ability to appreciate wholes and gain system awareness of the issues surrounding policies’ (Ryan, 2000, p.359)

As far as the knowledge gain from a modelling activity is concerned, we contend that this is yielded from the mediation being established between the internal and external loops of a modelling activity. The very role of simulation in relating (mapping) the *construct-domain* hypothetical statements in the internal loop (i.e. the mental constructs used for the purpose of providing organising principles to interpret real world) onto *protocol-domain* real-world experience, in the external loop, (Marney and Tarbert, 2000) is likely to be put in a new light.

On the one hand, the analytical potentials of simulation strengthen the operational capabilities of urban modelling, i.e. they make it easier to *replicate* urban phenomena and deal with their time unfolding.

On the other one, the very idea of replication stirs a quest to investigate the multiple and manifold mappings which can be established. It challenges our ordinary ways to grasp the world surrounding us. This ultimately reflects the more basic and encompassing need to organize the different ways for representing human knowledge (Minski, 2000).

4. Concluding remarks

In emphasizing some novel features of simulation in urban modelling a claim was made that these are associated with a new role of cognitive mediation that modelling activity is doomed to play in order to cope with the complexities of today cities.

Although not exhaustive, our arguments allow us to point out a few observations which can spur future enquire.

A first point is that simulation is not only associated with the operational realization of a modelling activity, but it is co-determined by it. On the one hand, as the role of cognitive mediation reinforces

the modelling potentials, also the functions of simulation are extended from technical/algorithmic to explorative. On the other one, as the progress in the technological and information backcloth makes simulation and the computer artefact more powerful, the role of a modelling activity is progressively affected, thus improving our knowledge gains and action capabilities to deal with urban complexities.

The effectiveness of these latter, however, and this is the second point to stress, will depend on how the cognitive mediation role of a modelling activity is actually instanced in the different situations. In this respect, the modelling experiences undertaken at Ires show that this can take various forms, i.e. intelligent package, decision support system and cognitive models. As a result, the role and functions of simulation are likely to vary accordingly, see Tab.3¹⁰.

Table 3 Forms of cognitive mediation of a modelling activity

	Main features of the model	Role of simulation
<i>Intelligent Package</i>	A model is an analytic device to duplicate in a simplified way an urban phenomenon	It allows the functioning of the computer object
<i>Decision Support System</i>	A model is an analytic device by which a (simplified) duplication of urban phenomena permits replications of our knowledge hypotheses about them	It links the functioning of the computer object with the external world
<i>Cognitive model</i>	A model is an artefact allowing us to duplicate how we replicate the learning process of urban phenomena	The external world is made functioning within a computer program

References

¹⁰ It is worth noting that whereas cognitive models can also be intelligent packages or a decision support systems, the contrary does not hold.

- Ballot G. and Weisbuch G. (eds.) (2000) *Applications of Simulations to Social Sciences*, Hermes, Paris.
- Batty M. (1994) A Chronicle of Scientific Planning. The Anglo-American Modelling Experience, *Journal of the American Planning Association*, 60, 7-16.
- Clark N., Perz-Treio F. and Allen P. (1995) *Evolutionary Dynamics and Sustainable Development. A system Approach*, Edward Elgar, Aldershot.
- Conte, R., Hegselmann, R. and Terna, P. eds. (1997) *Simulating Social Phenomena. Lecture Notes in Mathematical Systems 456*, Springer, Berlin.
- Couclelis H. (1998) Geocomputation in Context, in P. Longley, S.M. Brooks, R. McDonnell R. and B. MacMillan eds., *Geocomputation: A Primer*, Wiley, New York, 17-29.
- Cowan G.A., Pines D. (1994) From Metaphors to Reality? in Cowan G.A., Pines D. and Meltzer D. eds., *Complexity. Metaphors, Models and Reality*, Proceedings of the Santa Fe Institute Studies in the Science of Complexity, Addison Wesley, Reading MA.
- Dupuy J.-P. (2000) *The Mechanization of the Mind*, Princeton University Press, Princeton.
- Epstein J. (1999) Agent-Based Computational Models and Generative Social Science, *Complexity*, 4, 5, 41-60.
- Gilbert N. (2000) Modelling Sociality: The View From Europe, in Kohler T. A., Gumerman G.J. (eds.), *Dynamics in Human and Primate Societies*, Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity, Oxford University Press, Oxford, 355-371.
- Gilbert N. and Troitzsch K.G. (1999) *Simulation for the Social Scientist*, Open University Press Philadelphia.
- Havelange V. (1998) Le social en débat: cognition ou interprétation, *Intellectica*, 1-2, 9-55.
- Hutchins E. (1998) Mental Models as an Instrument for Bounded Rationality, [www: cogsci.ucsd.edu/hutchins](http://www.cogsci.ucsd.edu/hutchins).
- Marney J.P., Tarbert H.F.E. (2000) Why do simulations? Towards a working epistemology for practitioners of the dark art, *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 3(4). (<http://www.soc.surrey.ac.uk/JASSS/3/4/4.html>)
- Minski M. (2000) Common sense-Based Interfaces, *Communications*, 43, 8, 66-74.

- Occelli S. (2001a) Why modelling: the Cognitive Drive, Paper presented at the INPUT Meeting, Isole Tremiti, 26-29 June, 2001.
- Occelli, S. (2001b) La cognition dans la modélisation: une analyse préliminaire, in Paugam-Moisy, Nyckess V., Caron-Pargue J.(eds.) *La cognition entre individu et société*, ARCo'2001, Hermes, Paris, 83-94.
- Occelli, S. (2002a) Facing urban complexity: towards cognitive modelling. Part 1: modelling as a cognitive mediator, Paper presented at the XII European Colloquium on Theoretical and Quantitative Geography, St.Valery-en-Caux, 7-11 September, 2001. www.cybergeog.fr.
- Occelli, S. (2002b) L'uso dei modelli nelle Scienze regionali: da strumenti analitici a mediatori cognitive, Relazione presentata al Seminario AISRE, Scienze Regionali ed Interdisciplinarietà, 31 Maggio, Torino.
- Occelli S., Landini S. (2002) Le attività di modellizzazione all'Ires: una rassegna e prime considerazioni., WP 160, IRES, Torino.
- Occelli, S., Rabino, G.A. (2000a) Rationality and Creativity in Urban Modelling, *Urbanistica*, 113, 2000, p.25-27.
- Occelli S., Rabino G.A. (2000b) *Modelling for the sustainable city. A contribution of thinking to action*, Paper presented at the World Congress 'HUMANKIND AND THE CITY. TOWARDS A HUMAN AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT', Naples, 6-8 September 2000.
- Moss S. (1999) Relevance, Realism and Rigour: A third Way for Social and Economic Research, CM Report, N. 99-56, www.cpm.mm.ac.uk
- Pidd M. (1996) *Tools for Thinking. Modelling in Management Science*, Wiley, New York.
- Ryan T. (2000) The Role of Simulation Gaming in Policy-Making, *Systems Research and Behavioural Science*, 17, 359-364.
- Wegener M. (1994) Operational Urban Models, *Journal of the American Planning Association*, 60, 17-29.
- Zeleny M. (1996) Knowledge as a coordination of action, *Human System Management*, 155, 211-213.

Niveaux d'abstractions, trans-disciplinarité et modélisation objet des interactions multi-agents sur des réseaux : problèmes d'interprétations.

Réflexions d'un néophyte (non informaticien) à partir de l'expérience de la modélisation d'une plate-forme dédiée à la simulation des interactions multi - agents sur des réseaux dans une perspective d'économie cognitive et historique

Denis Phan

Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications de Bretagne & ICI

Communication aux journées de Rochebrune 2003

Résumé

La construction de systèmes artificiels fondés sur des agents autonomes se donne pour objectif d'identifier des règles fondamentales qui régissent l'ensemble des systèmes adaptatifs complexes indépendamment des contingences matérielles spécifiques à ces systèmes, qu'ils soient physiques, biologiques ou sociaux. Ces systèmes produisent ainsi des formes *abstraites d'organisations*, qui résultent des interactions entre les agents, mais qui conditionnent en retour le comportement de ces agents. Notre démarche se situe dans la tradition de ceux qui associent ces formes d'organisation à l'existence d'un nombre limité d'attracteurs du système dynamique ainsi formé. La plate forme Moduleco a ainsi été conçue initialement pour formaliser la dynamique d'interactions multi-agents sur des réseaux dans une perspective d'économie « cognitive » et « historique ».

Dans ce papier, on adresse trois questions à cette méthode, sur la base de l'expérience de simulation et conceptualisation informatique ainsi acquise. (1) Premièrement, quel peut être le domaine de validité épistémologique d'une telle démarche dès lors que le domaine d'application concerne les sciences sociales ? Cette question pose en particulier le problème des capacités réflexives des agents humains. Elle est traitée du point de vue de l'interprétation, ce qui renvoie à la question des niveaux d'abstractions dans la démarche de représentation d'un champ de connaissance. (2) Deuxièmement, la question de l'articulation des niveaux d'abstractions renvoie elle-même à une pratique de l'articulation entre domaine disciplinaires, qui sera évoquée ici à travers l'exemple de l'interprétation de modèles de « petits mondes » qui possèdent des propriétés communes en physique statistique et en économie. (3) Troisièmement, la physique statistique possède des méthodes rapides et bien établies de simulation procédurale des modèles sous revue. Quel peut être l'apport interprétatif d'une architecture multi-agent orientée objet et peut-on établir un rapport entre les niveaux d'abstraction du framework et ceux des matrices disciplinaires évoquées en (1). Le point de vue réflexif exprimé dans ce papier est celui d'un économiste modélisateur et non d'un informaticien.

Niveaux d'abstractions, trans-disciplinarité et modélisation objet des interactions multi-agents sur des réseaux : problèmes d'interprétations.

Réflexions d'un néophyte (non informaticien) à partir de l'expérience de la modélisation d'une plate-forme dédiée à la simulation des interactions multi - agents sur des réseaux dans une perspective d'économie cognitive et historique

Denis Phan

Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications de Bretagne & ICI

Esquisse pour une communication aux journées de Rochebrune 2003

Version très préliminaire ; merci de télécharger une mise à jour à l'adresse :

<http://www-eco.enst-bretagne.fr/~phan/moduleco/RocheBrunePhan.pdf>

Qu'y a-t-il de commun entre des verres de spin, le système immunitaire, une colonie de fourmi, un vol de moineau (ou de chauve-souris), un mouvement de foule et l'évolution d'un cours boursier ? Ces ensembles, physiques, vivants, animaux, humains, ou artefact sont composés d'éléments en interaction et la dynamique ces interactions est susceptible d'engendrer des phénomènes agrégés ordonnés. Ceux-ci sont souvent qualifiés « d'émergents » dans la littérature au sens où les propriétés de l'ensemble ne sont pas « inscrites » dans les propriétés des parties, Il s'agit là d'une définition standard de l'émergence dans un système complexe basé sur des agents (en économie on parle de ACE : *Agent-based Computational Economics* cf. Tesfashion, 1997, 2001a, 2001b). Cette conception de l'émergence n'implique pas l'impossibilité d'une approche *explicative* de ces phénomènes (Epstein, 1999). En particulier, la construction de systèmes artificiels fondés sur des agents autonomes se donne pour objectif d'identifier des règles fondamentales qui régissent l'ensemble des systèmes adaptatifs complexes indépendamment des contingences matérielles spécifiques à ces systèmes, qu'ils soient physiques, biologiques ou sociaux. Ces systèmes produisent ainsi des formes *abstraites d'organisations*, qui résultent des interactions entre les agents, mais qui conditionnent en retour le comportement de ces agents. Notre démarche se situe dans la tradition de ceux qui associent ces formes d'organisation à l'existence d'un nombre limité d'attracteurs du système dynamique ainsi formé.

La plate-forme Moduleco a été conçue par l'informaticien Antoine Beugnard et moi-même dans l'objectif de fournir à la communauté des économistes un outil de conceptualisation et de simulation puissant pour traiter un certain nombre de problèmes inhérents à l'émergence et au fonctionnement d'institutions économiques comme les marchés ou les organisations, et plus généralement de tout système social concerné par la combinaison de choix individuels dans un *contexte d'interaction multi-agents dans les réseaux*. Une application plus pratique, mais encore embryonnaire qui ne sera pas abordée ici concerne également le développement d'outils de simulation et de conseil pour l'aide à la décision dans le domaine des marchés de l'Internet et des systèmes d'information

Conformément à la méthode préconisée par les concepteurs de systèmes artificiels fondés sur des agents autonomes, ce type de plate-forme produit d'abord des *résultats génériques*, communs aux systèmes naturels, vivants et humains. Bien entendu, ces résultats, qui se situent à un haut niveau d'abstraction, doivent ensuite être replacés dans leur contexte pour être *interprétés* par une discipline particulière, ce que nous montrerons. Trois problèmes se posent alors : premièrement celui de l'articulation des niveaux d'abstractions entre eux ; deuxièmement celui de la capacité réflexive des agents humains ; troisièmement celui de pertinence d'une « couche herméneutique » dans l'échafaudage conceptuel hiérarchique ainsi articulé, question cruciale dans le cas d'application aux sociétés humaines.

Une première approche des ces questions intervient pratiquement lorsque l'on cherche à « caler » le modèle conceptuel de la plate-forme sur un certain nombre de simulations et de formes d'organisation issues du monde physique (par exemple le modèle d'Ising), vivant (des modèles de coévolution d'espèces) ou artificiel (comme le « jeu de la vie » du mathématicien Conway). Comme formaliser et éventuellement réifier l'emboîtement entre ces modèles et les modèles sociologiques et/ou économiques qui nous concernent ? Cette question de l'emboîtement ou plus généralement de l'articulation des niveaux d'abstractions renvoie elle-même à une pratique de l'articulation entre domaines disciplinaires, qui sera évoquée ici à travers l'exemple de l'interprétation de modèles de « petits mondes » qui possèdent des propriétés communes en physique statistique et en économie.

Enfin, la physique statistique possède des méthodes rapides et bien établies de simulation procédurale des modèles sous revue (ie. Monte-Carlo). Quel peut être *l'apport interprétatif* d'une architecture multi-agent orientée objet ? Peut-on établir un rapport entre les niveaux d'abstraction du framework et ceux des matrices disciplinaires ? Dans cet article, nous nous référerons à un certain nombre de modèles connus (ou moins connus) pour souligner tel ou tel point de l'argumentation. Nous renvoyons aux articles originaux pour une présentation complète des modèles en particulier à Phan (2003)¹.

¹ Un certain nombre de ces modèles sont présentés de manières plus extensives dans un livre à paraître en 2003 chez Springer : Bourguin P., Nadal J.P. eds. (2003) *Towards a Cognitive Economy*.

1 - L'approche « artificielle » des phénomènes complexes et la question des niveaux d'abstraction.

Nous désignons ici par approche "artificielle" des phénomènes complexes la reproduction " *in silico* de représentations stylisées de phénomènes naturels ou sociaux vus comme des systèmes complexes adaptatifs ². Par nature, ces représentations sont hautement abstraites. Plus spécifiquement, la construction de systèmes artificiels fondés sur des agents autonomes vise à abstraire des différents systèmes naturels des propriétés formelles analogues (Bonabeau, 1994).

Comme nous l'avons souligné en introduction, cette approche repose sur l'identification des *interactions dynamiques entre les agents*, éléments du système, et des effets de ces interactions sur les agents et sur le collectif qu'ils forment. La formalisation de ces interactions au travers d'une *organisation abstraite*, intégrant les interactions entre agents et leurs effets individuels et collectifs, permet, suivant Bonabeau, *d'étudier les causalités formelles associées à ce système formel indépendamment des contingences matérielles associées aux systèmes réels*.

L'objectif affiché par les tenants de cette approche est alors de *trouver les règles fondamentales qui régissent l'ensemble des systèmes adaptatifs complexes*. Selon cette perspective, *on fait apparaître l'ordre comme produit inévitable* (un attracteur) *de la dynamique du système*, sans préjuger pour autant de l'importance des facteurs matériels (Bonabeau, 1994, p.16) ; « l'expérimentation par simulation » est alors la voie privilégiée pour l'étude de ces systèmes artificiels. Une approche analytique n'est pas exclue a priori, mais elle se révèle souvent difficile à mettre en œuvre, l'exploration synthétique au moyen de simulations informatiques apparaît alors plus appropriée.

La dynamique des systèmes complexes (Weisbuch, 1989, Schuster 2001) peut en effet varier en fonction des circonstances. Dans de nombreux cas, *il n'y a pas de proportionnalité entre les causes et les effets*. Un phénomène intéressant dans de tel système est bien connu en physique des systèmes désordonnés : il s'agit de la transition de phase. (Hors 1995 pour une discussion de l'intérêt de cette notion du point de vue d'un économiste). Dans le plus simple cas de transition de phase, le système bifurque entre deux états opposés, mais de nombreuses autres dynamiques peuvent être observées. Les physiciens attribuent ce phénomène à une rupture de symétrie dans le système. (Anderson, Stein 1983). La rupture de symétrie permet l'apparition de nouveaux phénomènes qui n'existent pas dans un état symétrique. Les systèmes complexes, fortement non linéaires, résistent (généralement) aux méthodes

² Sur l'histoire de l'approche de Santa Fe des systèmes complexes, (SFA) cf. Waldrop (1993) Sur les systèmes adaptatifs complexes eux-mêmes, cf. Weisbuch (1989), Cowan & alii (1994), Schuster (2001). Pour une vision des phénomènes économiques comme des Systèmes complexes adaptatifs, cf. Anderson, Arrow, Pines (1988), Arthur, Durlauf, Lane (1997)

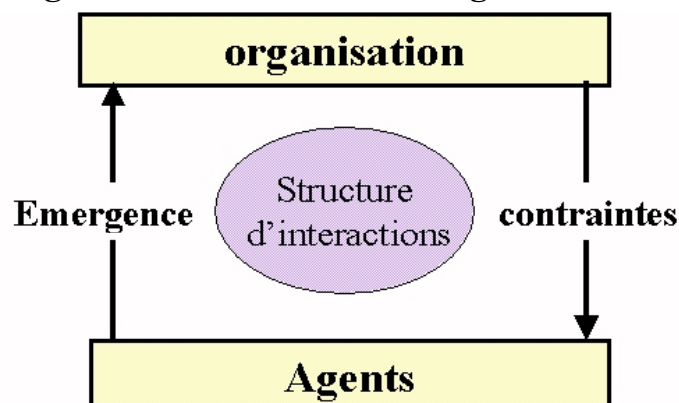
classiques de l'analyse mathématique (réductionnisme). Pourtant ils peuvent être régis par des processus évolutifs simples.

Dans cette section, on discute dans un premier temps de la question de l'émergence dans les systèmes artificiels. Si du point de vue de la physique, les phénomènes émergents peuvent être associés à des ruptures de symétrie, on peut également considérer que ces phénomènes, lorsqu'ils se traduisent par des irréversibilités, peuvent introduire de l'historicité dans l'évolution du système considéré. Dans le cas des agents humains, la réflexivité, qui donne aux agents éducatifs la possibilité de conceptualiser les phénomènes émergents donne un sens nouveau à cette historicité, déjà présente dans les phénomènes naturels. C'est cette possibilité d'apprentissage spécifique à l'humain que l'économie cognitive cherche à intégrer. Une seconde section sera consacrée à cette approche et au rôle que peut jouer l'économie computationnelle, ou plus spécifiquement l'approche *ACE (Agent Based Computational Economics)* utilisée par les économistes (Tessier 1997, 2001, 2002b, 2002c) dans la démarche de l'économie cognitive. On revient dans un troisième temps sur les aspects conceptuels de la question de l'intégration des niveaux d'abstraction, qui sera discutée à travers un exemple dans la section suivante.

1.1. Les systèmes artificiels fondés sur des agents autonomes: un outil pour formaliser les dynamiques historiques.

Dans les modèles multi-agents, c'est l'*interaction* entre les éléments du système qui est à la source principale des dynamiques macroscopiques observables. Les effets des interactions peuvent apparaître totalement aléatoires même si elles sont produites par des règles purement déterministes, comme dans le modèle évolutionnaire de dilemme du prisonnier spatial inspiré de May, Nowak (1992, 1993) que l'on trouve dans Moduleco (Phan, 2003) Ils peuvent aussi conduire à l'émergence d'un ordre (structure, organisation).

Figure 1 : interactions et émergence d'ordre



L'*émergence* est la propriété centrale des systèmes dynamiques fondés sur des agents autonomes en interaction. De leurs interactions locales, émergent les *propriétés globales du système que l'on ne saurait prédire par la seule connaissance des règles*

qui gouvernent les éléments qui le composent. Elle résulte de la confrontation des agents sur la structure d'interaction : une meilleure connaissance analytique des propriétés génériques de la structure d'interaction (comme la nature des attracteurs et des dynamiques associées) devrait permettre une meilleure connaissance de ces propriétés émergentes.

Un des premiers exemples d'émergence fondée sur des interactions sociales peut être trouvé dans les modèles de ségrégation de Schelling (1969, 1971, 1978). Celui-ci avait pour but de montrer que des structures résidentielles ségrégationnistes (ghettos) pouvaient apparaître même si les préférences des habitants étaient compatibles avec une structure intégrée des populations, ce qui est le cas avec des préférences faibles, comme par exemple : « j'accepte d'habiter avec un voisinage majoritairement différent de moi, sauf si je suis trop minoritaire ». Dans ce modèle, *les agents n'interagissent que localement, avec leurs 8 voisins immédiats*³. Ils ne sont pas concernés par la configuration générale de l'habitat.

Chaque agent accepte un voisinage majoritairement différent pour peu qu'il y ait au moins 37,5% de voisins semblables. En pratique, Schelling propose la règle du jeu suivante : si je n'ai qu'un ou deux voisins, un au moins doit être semblable à moi (au plus 50% de différence) ; si j'ai entre trois et cinq voisins, deux au moins doivent m'être semblables (33 %, 50%, 60% de voisins différents) ; et si j'en ai six à huit, trois au moins doivent être semblables (50%, 57,1%, 62,5% de voisins différents). *Les interactions locales suffisent pour faire apparaître des configurations globales fortement homogènes : la ségrégation est une propriété émergente du modèle.* Cependant certaines configurations locales intégrées - des îlots, par exemple - peuvent être résistantes aux perturbations extérieures. Les structures fortement intégrées sont instables lorsqu'elles sont confrontées à des perturbations aléatoires, alors que les structures homogènes sont beaucoup plus stables ("zones gelées").

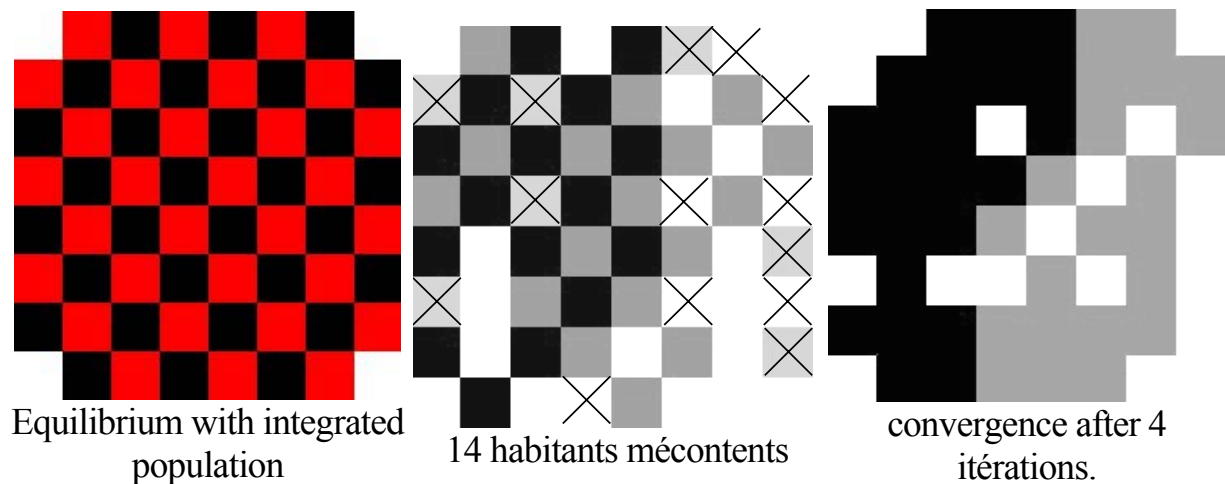
On dispose, sans remplir les coins, 60 habitants, 30 "rouges" et 30 "noirs" sur un damier 8x8. L'intégration complète correspond à un ordre où les habitants sont disposés alternativement, de telle sorte qu'un habitant, quelque soit sa couleur, ait exactement quatre voisins rouges et quatre noirs à partir de n'importe quelle position au delà de la rangée de bordure. Pour les rangées du bord, on trouve alternativement deux (ou trois) semblables sur les cinq voisins, et deux de chaque près des coins. Cette configuration d'intégration maximale est un équilibre, puisque aucun habitant ne souhaite déménager.

Sur la copie d'applet java représentée sur la figure 2, on perturbe ensuite la distribution. Schelling enlevait (à la main) 20 habitants et en rajoutait 5 au hasard. Les habitants mécontents de leur voisinage apparaissent barrés d'une croix. Ces derniers déménagent en cherchant au hasard une localisation conforme à leurs vœux.

³ Il s'agit d'un voisinage de « Moore », cf. § 4.2.1.

Ces déplacements engendrent de nouveaux mécontentements et la population continue à bouger jusqu'à ce qu'un nouvel équilibre soit atteint. celui-ci peut correspondre à un état de parfaite ségrégation, ou parfois, laisser subsister des zones d'intégration ou des « niches » de différence au sein d'une population homogène.

Figure 2 - Original (checkerboard) Schelling Model



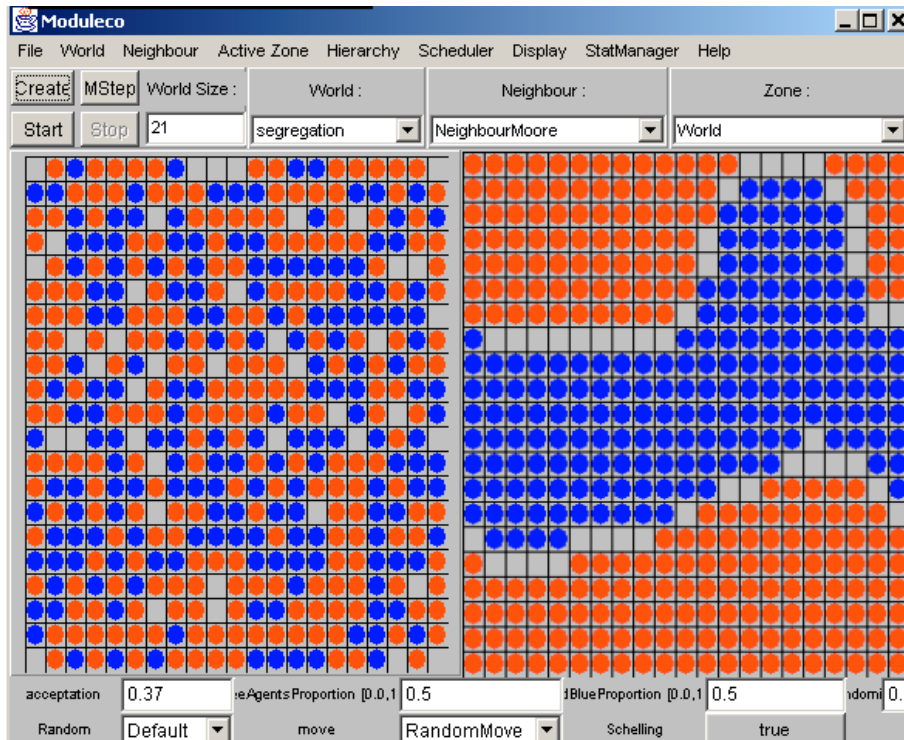
<http://www-eco.enst-bretagne.fr/~phan/complex/schelling.html>

Dans le modèle de Schelling, la formation de Ghetto est le résultat *inintentionnel* de la composition des comportements individuels. L'intention des agents est dans ce cas de ne pas être trop « isolé », non de créer une nouvelle organisation de l'espace. Une telle structure est dite « émergente » car *elle ne figure pas dans l'espace des choix des agents préalablement à sa formation*. Elle n'est la conséquence du comportement de personne en particulier, mais tous contribuent directement ou indirectement à cette émergence.

Le modèle de Schelling a été développé sur la plate-forme multi-agents Moduleco (avec des agents effectivement « mobiles » - cf. Figure 3) . On retrouve les résultats du modèle initial pour différents algorithmes de déplacement et différentes tailles du réseau.

Le principe créatif de l'émergence est une propriété centrale des systèmes dynamiques complexes. Mais les effets des interactions sur les structures n'apparaissent pas de manière homogène dans le temps on peut observe des périodes de stabilité ponctuées par des périodes de crise. Celles ci peuvent caractériser l'adaptation du système (complexité temporelle cf. par exemple Bak, Sneppen, 1993) ou encore la transition d'un niveau d'organisation à l'autre. En effet, dans un monde « *linéaire* », le principe de proportionnalité associe aux petites perturbations de petits effets, tandis que des perturbations majeures sont nécessaires pour entraîner des ruptures. Les situations qui nous intéressent correspondent à un monde essentiellement non linéaire. Le principe de proportionnalité n'est plus respecté et les dynamiques y sont non linéaires : il se peut que des modifications de l'environnement d'ampleurs similaires produisent des changements d'importance très variés.

Figure 3 - Moduleco adaptation of the Schelling's model



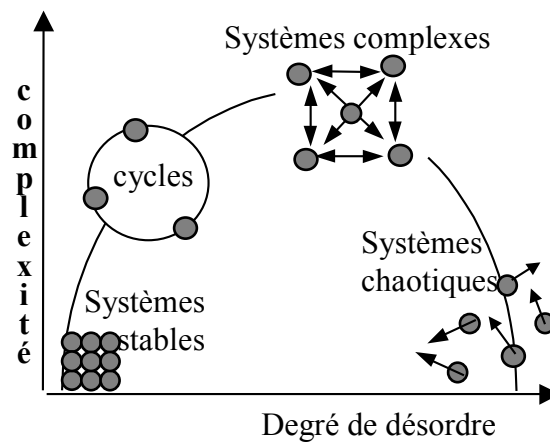
Ainsi, les propriétés du système dynamique que constitue un réseau d'automates sont entièrement définies par la donnée du mode d'itération, des caractéristiques individuelles des automates et de la structure d'interaction entre ses éléments. Il est possible d'identifier des attracteurs de ce système, auxquels peuvent être associés des bassins d'attraction, et d'en étudier les propriétés (point fixe, cycle ...) ainsi que la sensibilité aux perturbations d'état comme aux perturbations structurales (modifications de la structure d'interaction).

Langton (1991) a en montré que l'on peut identifier un paramètre dans les réseaux d'automates dont la variation conduit du point fixe au désordre du chaos en passant par le cycle puis par la « frontière du chaos ». A cette occasion, Christopher Langton a introduit une analogie entre les dynamiques du réseau et les phases de la matière (on prendra l'exemple de l'eau). Le point fixe (et d'une certaine manière le cycle) qui caractérise un réseau complètement ordonné, figé, correspond à l'état solide. Le chaos à l'état gazeux. La « frontière du chaos » correspondrait à l'état liquide, producteur d'ordres évolutifs. Si l'on pousse un peu plus loin l'analogie, dans l'écosystème terrestre, l'eau est liquide à la surface du globe, tout en étant à l'état gazeux dans l'atmosphère et à l'état solide à la proximité des pôles. Notre écosystème se trouve donc dans un état global métastable, sans arrêt perturbé aux frontières par des transitions de phase d'un état vers l'autre.

Certains chercheurs, comme Stuart Kauffman (1993, 1995a, 1995b) émettent alors la conjecture suivante : les phénomènes évolutifs du vivant se dérouleraient « à la frontière du chaos » (selon le titre de l'ouvrage d'Heudin, 1998). Dans ce qui suit, nous n'aborderons pas les problèmes sous cet angle un peu métaphysique, et nous

nous limiterons à tenter d'identifier dans quelle mesure notre connaissance de certains phénomènes économiques peut être enrichie par ces résultats.

Figure 4 : dynamique des systèmes et complexité



Dans les sciences sociales, la question de l'émergence pose un problème particulier : on ne peut pas exclure à priori la possibilité pour un agent de détecter et d'intégrer dans ses représentations des formes émergentes d'organisation, mais la formalisation de cette capacité reste un défi pour le modélisateur (Gilbert, 1995). Swarm, plateforme pionnière dans le domaine, avait dès le départ intégrée la possibilité pour les agents de disposer d'une représentation du monde dans lequel ils évoluent. Par exemple, un loup peut se représenter le terrain sur lequel il évolue et les moutons qu'il y chasse. Mais il s'agit de représentations d'objets qui ont une matérialité. dans le cas des sociétés humaines, les hommes intègrent des représentations conceptuelles qui n'ont pas de matérialité directes⁴.

Plus spécifiquement, un certain nombre de questions conceptuelles sont alors adressées au modélisateur. Si l'on adopte le point de vue de Mary Douglas (1986) et que l'on conçoit l'esprit individuel (c'est à dire le système de représentation des agents) comme une "société miniature" (op. cité intro chapitre 4), deux défis se posent à nous. Premièrement, avec quel degré de précision l'agent se représente-t-il le monde dans lequel il se trouve ? En particulier, comment se représente-t-il les autres agents et leur processus de décision ? Les économistes et les théoriciens des jeux connaissent depuis Keynes (1936) les risques de récursivité infinie dans un tel processus (cf. par exemple Walliser 2000). Une sortie de cette impasse consisterait à adopter une conception cognitive de la rationalité et à y intégrer de manière explicite une modélisation des représentations collectives⁵. Un second défi concerne le statut de l'expérimentateur relativement à l'agent et sa prise en compte dans la modélisation objet des plate-formes. La majorité de ces dernières comprennent des composants

⁴ sur cette question cf. Granger, 1967, 2000 pour une qualification simple de la position réaliste "bien tempérée" qui est adoptée ici.

⁵ sur les aspects conceptuels de la formalisation des représentations collectives, cf. par exemple Douglas 1986, Orléan 2003.

d'observation et d'analyse des phénomènes simulés. Pourquoi ces fonctionnalités ne seraient-elles pas également à la disposition des agents eux mêmes ? ne pas le faire ne reviendrait-il pas à donner un statut de démiurge au modélisateur et à l'expérimentateur relativement à la réalité sociale, humaine, dont il cherche à rendre compte ?

1.2. - Moduleco : une plate forme trans-disciplinaire pour l'économie cognitive computationnelle

Moduleco est une plate-forme « multi-agents », à l'intersection de plusieurs disciplines, conçue pour simuler les marchés et les organisations, les phénomènes sociaux et la dynamique des populations. Il s'agit donc de faire de l'économie cognitive computationnelle (figure 5)

Qu'est ce que " l'économie cognitive " ?

L'économie cognitive (Walliser, 2000) peut être définie à deux niveaux, individuel et collectif. Au *niveau individuel*, il s'agit d'étudier les croyances, raisonnements et processus de décision qui gouvernent les choix économiques (y compris dans leurs dimension techniques et organisationnelles). C'est un *programme "cognitivist"* qui met l'accent sur les processus d'apprentissage, formation et révision des croyances présidant aux décisions et comportements des agents. Au *niveau collectif*, il s'agit d'étudier l'effet des interactions sociales sur la formation des grandeurs économiques agrégées et sur l'émergence et la régulation des formes organisationnelles, institutionnelles et techniques qui résultent, de manière délibérée ou involontaire des actions individuelles. C'est le *"programme évolutionniste"*, qui met l'accent sur les processus d'adaptation des agents à leur environnement, en particulier au sein de réseaux ou de structures d'interaction spécifiques.

Ces deux niveaux sont interdépendants, puisque le collectif est la résultante des processus de délibération cognitifs qui sous tendent les choix individuels et que les choix individuels doivent incorporer de manière plus ou moins explicite les contraintes et opportunités associées au " collectif " et aux effets des actions individuels sur le collectif, lorsque ces effets sont identifiables (ce que nous appellerons une rationalité " située ".

Les modèles " multi-agents " et la formalisation des apprentissages individuels et collectifs

Les deux dimensions "cognitivist" et "évolutionniste" peuvent être "opérationnalisées" dans le cadre de modèles multi-agents, Il s'agit d'une modélisation informatique explicite des agents et de la structure dans laquelle ils communiquent et/ou interagissent. Pour prendre en compte la dimension cognitive, il doit être possible de placer " dans la tête des agents " une représentation explicite du monde et de ses interactions, sous réserve d'hypothèses spécifiques sur la capacité cognitive des agents, nécessairement limitée, à la fois par soucis de réalisme et surtout pour éviter le paradoxe de la récursivité infinie des spéculations croisées des

agents, souligné par Keynes dans le célèbre chapitre 13 de la " Théorie Générale". On distinguera donc les systèmes multi-agents selon deux grandes classes de caractéristiques qui renvoient respectivement à l'une et l'autre des dimensions de l'économie cognitive : les apprentissages individuels et les apprentissages collectifs. Cependant, une bonne compréhension des phénomènes supposent des avancées progressives. Ainsi, on observe une spécialisation entre les modèles centrés sur la dimension individuelle et d'autres plus centrés sur les interactions collectives.

En ce qui concerne les apprentissages individuels, Bourguin (1993) distingue plusieurs niveaux de rationalité des agents selon leur relation à leur environnement et leur capacité à modéliser le réel.

Les agents réactifs réagissent de manière fixe à l'information provenant de leur environnement, sur le mode stimulus-réponse (réponse sensori-motrice ou " pavlovienne " héritée génétiquement) : il y a absence d'apprentissage.

Les agents hédoniques apprennent (par auto-renforcement) à modifier leur comportement afin d'augmenter leur " plaisir ". Ils sont capables d'anticipations " hédoniques " et d'adaptation lente à partir de leur expérience historique, ce qui suppose un niveau de conscience plus élevé que l'agent réactif (consciousness).

Les agents éductifs sont dotés d'une capacité de modélisation de leur environnement, ce qui suppose la capacité de former des représentations symboliques, de simuler les conséquences d'une action sur leur environnement, et donc un niveau de conscience plus élevé (awareness).

Selon une perspective plus proche des catégories de l'économiste, Walliser (1997) propose une typologie des processus qui permettent de converger vers un équilibre en théorie des jeux. Il en distingue quatre, soit par ordre décroissant des capacités cognitives attribuées aux agents :

Dans un processus éductif, chaque joueur dispose d'assez d'information pour simuler parfaitement le comportement des autres joueurs, ce qui conduit immédiatement à l'équilibre : il n'y a pas d'apprentissage.

Dans un apprentissage épistémique, chaque joueur révise ses croyances relatives aux stratégies des autres adversaires à partir des informations qu'il a pu observer (Fudenberg, Levine, 1998).

Dans un apprentissage comportemental, chaque joueur modifie sa stratégie compte tenu des résultats observés de ses propres actions dans le passé (agent hédonique).

Dans un apprentissage évolutionnaire, chaque joueur joue une stratégie fixe qui se reproduit proportionnellement au gain obtenu lors de confrontations aléatoires (agent réactif).

Des agents dotés de différentes capacités cognitives peuvent co-évoluer au sein de populations cognitivement polymorphiques et les résultats obtenus dans ces simulations viennent étendre d'une certaine manière d'autres résultats obtenus de

manière analytique dans le cadre des jeux évolutionnaires (voir par exemple Banerjee, Weibull (1995), qui font co-évoluer des agents programmés (au comportement fixé), et des agents éducatifs qui jouent de manière rationnelle).

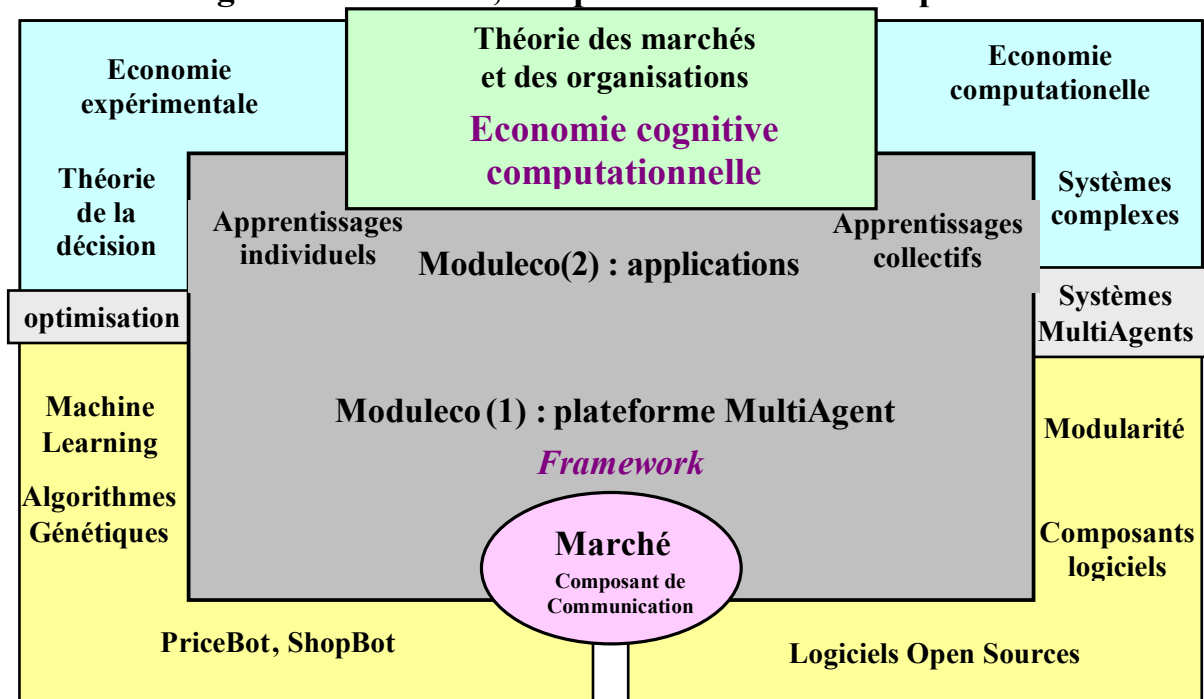
Au niveau des apprentissages collectifs, des phénomènes de dépendance structurelle peuvent apparaître lorsque l'on prend en compte des externalités dans les choix sociaux, la formation des opinions. L'étude de telles interactions et de leurs conséquences sur les processus de marché apparaît comme un domaine d'investigation en soi, qui justifie parfois que l'on néglige les phénomènes d'apprentissage individuels proprement dit (Dalle, Foray, 1995).

Plus généralement, Kirman (1998) souligne l'importance de l'information disponible dans les processus de marché et recommande d'étudier la structure communicationnelle de ces flux d'information. En accord avec ces démarches, nous pensons également que la structuration d'un marché par ses canaux de communication permet de franchir une étape supplémentaire dans la compréhension du marché grâce à la formalisation (dynamique et spatiale) des interactions sur le marché considéré.

Moduleco et les champs théoriques de référence.

Sur la figure 5, on a présenté le domaine informatique dans les zones du bas et les disciplines applicatives dans les zones du haut. Dans le haut de cette figure, on mentionne les approches économiques et non économiques qui ont été prises en compte au niveau de la conception de la plate-forme. *Une finalité de Moduleco est d'intégrer la dimension individuelle et les dimensions collectives.* Les notions d'apprentissage individuel et d'apprentissage collectif seront précisées plus loin.

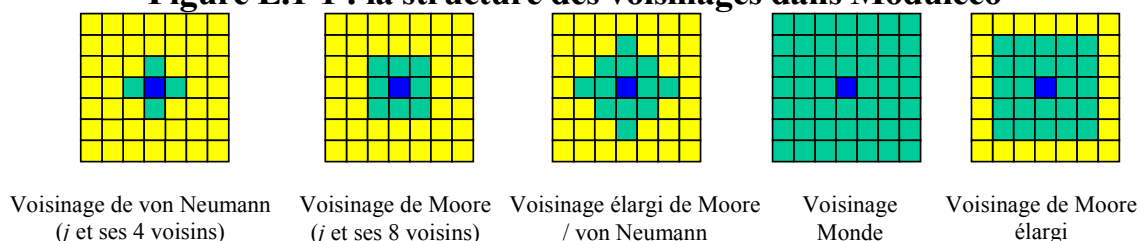
Figure 5 : Moduleco, une plate-forme trans-disciplinaire



Encadré 1 : voisinage et communication dans Moduleco

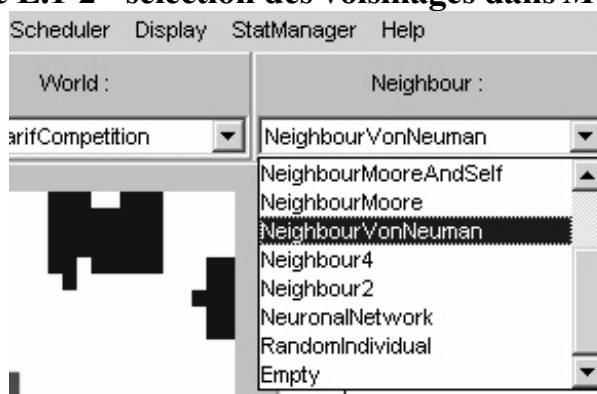
Dans Moduleco, le *voisinage* de chaque agent est la liste des autres agents avec qui il peut entrer en communication à l'aide d'un *medium*. La classe *NeighbourBuilder* construit le voisinage de chaque agent selon une topologie fixe, régulière ou aléatoire, ou encore variable dans le temps. Parmi les configurations fixes, le voisinage de *von Neuman* comprend les 4 voisins les plus proches sur un plan ou un tore, et le voisinage de *Moore*, les 8 plus proches voisins... On peut également élargir le voisinage d'un agent ou adopter des topologies multi - dimensionnelles variées.

Figure E.1-1 : la structure des voisinages dans Moduleco



Un voisinage « *random pairwise* » permet de coupler les agents deux à deux sans redondance. Le voisinage le plus complet (NeuralNetwork) peut être assimilé à un réseau de neurones où chaque agent est potentiellement connecté avec tous les autres et où l'intensité de la connexion varie comme le poids synaptique. L'ensemble de ces configurations de voisinage est accessible simplement par un menu déroulant (Figure 6). Cette fonctionnalité permet de comparer les propriétés génériques de différentes structures de communication pour un même modèle de marché.

Figure E.1-2 - sélection des voisinages dans Moduleco



Un des intérêts de Moduleco est ainsi de pouvoir refaire la même simulation en changeant de voisinage afin d'observer si les résultats sont globalement et localement similaires (Atxell 2000b).

Pour une première approche, on retiendra l'économie expérimentale et la théorie de la décision comme deux démarches représentatives du programme « cognitif » de l'économie cognitive (Walliser, 2000). Bien entendu, ces deux démarches prennent en compte le collectif (par exemple la théorie de la décision interactive), mais elles sont orientées vers le comportement du décideur.

Quand on aborde la dimension collective, l'économiste reconnaît l'esprit le programme « évolutionniste » de l'économie cognitive au sens de Walliser (2000). Nous insisterons plus particulièrement ici sur l'intégration avec l'approche des systèmes complexes, dont la dimension économique a déjà donné lieu à deux ouvrages collectifs fort riches (Anderson, Arrow, 1988 ; Arthur, Durlauf, Lane, 1997).

../..

1.3. La question de la hiérarchie des niveaux d'abstraction.

Depuis Marx, les économistes et les spécialistes des sciences sociales sont familiarisés avec la question des niveaux d'abstraction. Les physiciens ont introduit la notion de « classes d'universalité » pour identifier la portée d'un phénomène ou d'une modélisation. Lorsque l'on adopte la démarche préconisée précédemment, trois questions se posent. Premièrement, quel est le nombre pertinent de degrés d'abstraction ? Deuxièmement, peut-on ou doit-on articuler ces niveaux entre eux, et comment le faire ? Troisièmement, quel est le statut méthodologique de l'interprétation que l'on peut associer à deux modèles dont les caractéristiques abstraites produisent des résultats similaires dans des domaines différents ?

Hodgson propose cinq niveaux d'abstraction emboîtés pour les sciences sociales. Au *premier niveau*, on trouve les *systèmes complexes en général*. Ce niveau correspond à des propriétés d'un grand degré d'universalité, d'une validité interdisciplinaire. Hodgson cite les catégories suivantes : « *variété, réplique, sélection, dépendance historique du chemin, rareté des ressources physiques, auto-organisation, structures dissipatives* ». Il conviendrait de discuter du degré comparé d'universalité de ces principes. On se limitera pour l'instant à poser la question de l'opportunité de scinder ce premier niveau en deux pour identifier les caractéristiques spécifiques au monde vivant et au monde physique, et celles qui sont communes à ces deux domaines. Il semble, de notre point de vue, qu'une limite de la vision propre à Hodgson dans ce domaine est liée à son absence de pratique de la formalisation directe de ces divers phénomènes. Pour notre part, nous aurions mentionné à ce niveau d'autres notions plus formelles et peut être plus génériques qui seront présentées au chapitre IV,

comme : loi de puissance⁶, attracteur d'un système dynamique, brisure de symétrie, phénomènes critiques, émergence etc...

Au *second niveau* d'abstraction, on trouve tout ce qui peut caractériser les sociétés humaines dans leur ensemble : les structures sociales, les institutions, la culture et le langage, la cognition, les coutumes, la socialisation... Au *troisième niveau* Hodgson situe les *sociétés complexes* que l'on qualifie de « *civilisations* ». Celles ci se dotent d'institutions spécifiques, comme la loi, la propriété, les contrats, l'organisation des échanges marchands, les états etc...

Au *quatrième niveau*, (« *type spécifique de formation sociale complexe* ») Hodgson spécifie des types de civilisation comme l'antiquité (?) le régime féodal, le capitalisme ... Le *cinquième niveau* d'abstraction est dédié à l'étude des *formes variées* que prennent chacun de ces types spécifiques dans le temps ou dans l'espace, comme par exemple les formes du capitalisme.

Pour illustrer cette hiérarchie, les modes de production du marxisme (esclavagisme, mode de production « asiatique », féodalisme, capitalisme) se trouvent au quatrième niveau, alors que les « stades » du capitalisme (l'impérialisme - Hilferding, 1910 ; le capitalisme monopoliste - Baran, Sweezy, 1966) se trouvent au cinquième niveau, tout comme les régimes de régulation régulationnistes. Indépendamment du découpage des niveaux proposés par Hodgson, *l'intérêt de cette hiérarchie des niveaux d'abstraction, est de pouvoir utiliser un certain nombre de propriétés génériques des niveaux les plus élevés⁷ pour caractériser des situations particulières, en particulier dans leur spécificité historique, sans que cela puisse être considéré comme une manipulation ad hoc.* Selon cette perspective, un *équilibre économique* est une caractérisation particulière d'un niveau d'abstraction plus faible que la notion *d'état d'un système dynamique*, qui relèverait du premier niveau. Son degré de pertinence dans un cas précis sera donc conditionnel à la spécification complète de ses caractéristiques, en adéquation avec le degré de détail requis pour le niveau d'abstraction où l'on se situe.

⁶ Nom générique donné à des distributions de probabilité dont la densité est de la forme $f(x) = a \cdot x^{-b}$, (loi de Pareto). La répartition des revenus et de nombreux phénomènes physiques peuvent être approximés par ce type de distribution où l'on a souvent des rapports de type « 20/80 » (20% des individus touchent 80% des revenus). Pour $a = b = 1$ on trouve une « loi de Zipf », qui décrit la fréquence des mots dans le langage. Ce type de lois possède deux caractéristiques. Premièrement, le carré de la variable aléatoire n'est pas intégrable pour les valeurs de $b \leq 3$, ce qui signifie qu'on ne peut pas calculer la variance (elle devient infinie quand b tend vers 3). Deuxièmement, à la fin des années cinquante, Benoît Mandelbrot a proposé de décrire la distribution des revenus au moyen d'une loi de Lévy qui a la propriété d'être stable par addition (on parle aujourd'hui de distribution « L-Stable ») et qui tend vers une loi de Pareto quand x devient grand. La classe des lois L-Stables est très générale puisque la loi de Normale et la loi de Cauchy en sont des cas particulier (Mandelbrot, 1997).

⁷ D'une *classe d'universalité* plus élevée, dirait un physicien

Pour revenir à la logique de l'intégration entre ces niveaux d'abstraction, c'est ce dernier point qui pose en fait problème, en particulier pour la majorité des travaux émanant des écoles historiques ou institutionnalistes :

« It is openly accepted here that the best of modern social science involves theorising that combines some general principles with a specific domain of analysis. The trouble however is that typically the meta-theoretical bases for such combinations are inadequately articulated. » (p. 40)

.../...

A chaque niveau correspond des formes d'explications spécifiques. Ainsi, au niveau de la physique trouve-t-on des explications causales et mécanistes. Au niveau de la biologie des explications causales et fonctionnelles. Ces dernières sont en général justifiées par les principes de la sélection naturelle. Pour Elster (1983), aucune théorie générale équivalente à la sélection naturelle ne s'applique au comportement humain. Les hommes, dotés de rationalité, peuvent faire des action dont les organismes biologiques sont incapables. En particulier leur capacité réflexive déjà évoquée, leur permet de conceptualiser l'évolution des structure elle-même et de modifier leur comportement en conséquence. Ainsi l'objet sur lequel porte les interactions économiques et social est il beaucoup plus versatile que d'autre objets historiques, comme ceux qui sont étudiés par exemple par les modèles de paléontologie ou de biologie des populations (Newman, Palmer, 1999). Ainsi suivant Hicks (1979) dirons nous que l'économie (et les autres sciences sociales) sont à la fois à la frontière des sciences naturelles et de l'histoire. Cette particularité, permet d'identifier l'étude des "sociétés artificielles" comme un champ spécifique, distinct (au sein ?) de la "vie artificielle" (par ex : Gilbert, Conte, 1995).

.../.. transtion...

2 - L'interprétation de phénomènes complexes relevant de champs différents, mais dont les propriétés génériques sont comparables : l'exemple des modèles de « petits mondes » en physiques statistique et en économie.

2.2. La sensibilité des résultats à la topologie du réseau relationnel : l'exemple des « petits mondes »

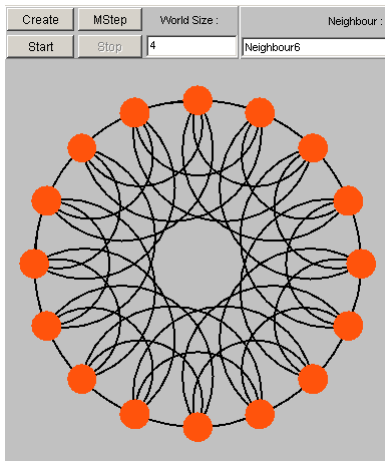
Les structures relationnelles stylisées tirées des enquête des sociologues correspondent à des réseaux qui ne sont ni réguliers ni complètement aléatoires. Si les propriétés des réseaux réguliers et des réseaux aléatoires sont assez bien connues des physiciens spécialisés dans l'étude dynamique des systèmes désordonnés, les configurations intermédiaires n'ont été explorées que dans les dix dernières années. Ces configurations intermédiaires peuvent jouer un rôle significatif dans les processus d'équilibration de marché et donc dans les résultats obtenus. Ainsi, Axtell (2002b) a cherché à évaluer à l'aide de la plate forme ASCAPE dans quelle mesure

la topologie du réseau relationnel pouvait influencer sur la robustesse des résultats obtenus par des simulations.

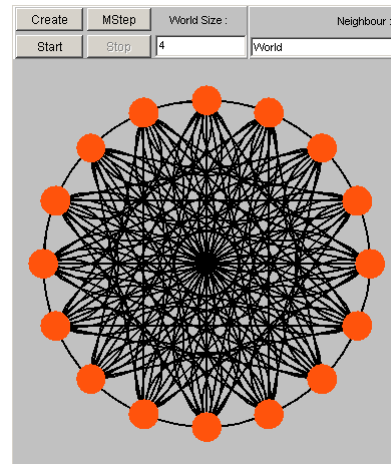
En économie, le formalisme du “petit mondes” (Small world) a été récemment introduit par différents auteurs. Il a d’abord été appliquée aux jeux bilatéraux (Jonard, Schenk, Ziegelmeyer, 2000 ; Jonard 2002) et aux processus de diffusion des connaissances et de l’innovation (Cowan, Jonard, 1999, 2000, 2001, 2003 ; Cowan-Jonard-Zimmermann 2001 et 2003). Il est aussi utilisé pour rendre compte de l’influence de la topologie des interactions sur l’organisation des marchés (Wilhite, 2001; Vannimemus & ali. 2002 ; Nadal, Phan 2002).

Ces travaux suivent la formalisation suggestive proposée par Watts and Strogatz (1998) dans le champs de la dynamiques des systèmes désordonnées. Cette relecture s’appuie elle même sur une abondante littérature provenant de la psychologie sociale et de la sociométrie, à la suite de l’article pionnier de Milgram, (1967), sur les “six degrés de séparation”.

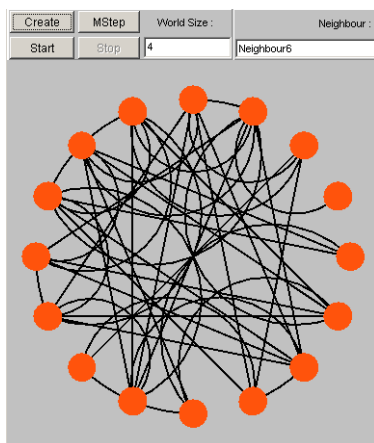
Figure 6 : réseaux régulier, aléatoires et "petits mondes"



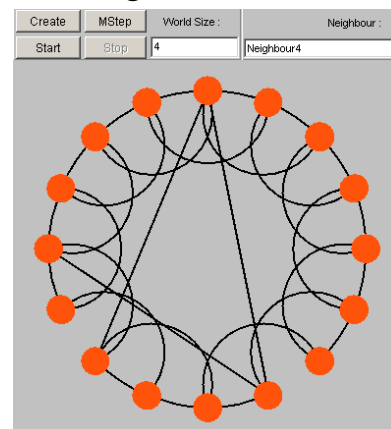
6.1. Réseau régulier - connectivité 6



6.2.- Réseau régulier – connectivité totale



6.3. - Réseau aléatoire – connectivité contrainte



6.4. – Petit monde « à la Watts-Strogatz ». Connectivité 4 ; 3 liens re-câblés

Le formalisme originel des « petits mondes » de Watts, Strogatz (WS) repose sur un réseau régulier où n agents sont positionnés sur un cercle (réseau périodique de dimension un). Chaque agent est en relation avec ses $2.k$ plus proches voisins sur le cercle. Dans l'algorithme de recâblage de WS, les liens peuvent être brisés et aléatoirement re-câblés avec une probabilité p . De cette manière, la connectivité reste constante, mais la dispersion de la connectivité des agents (la taille de leur voisinage) croît⁸. Pour $p = 0$ on a un réseau régulier et pour $p = 1$ un réseau aléatoire. Les valeurs intermédiaires entre 0 et 1 correspondent à des cas mixtes, où l'influence locale décroît lorsque p augmente.

Un grand nombre des propriétés des petits mondes sont maintenant bien connues (Watts 1999, Newman 2000). Zimmerman (2003) propose aux économistes une courte introduction aux propriétés des petits mondes « à la Watts Strogatz ». Une typologies des petits mondes selon leur propriétés distinctives est proposée par Barthelemy & ali (2000), et Barthelemy (2002).

La notion de « clustering » permet de décrire la structure locale d'un réseau. On définit ce coefficient par la moyenne du rapport du nombre de liens entre les voisins d'un point donné sur le nombre de liens maximal. Un graphe complet a un coefficient de clustering de 1 et celui d'un graphe aléatoire a un faible coefficient (de l'ordre de $1/N$). Watts et Strogatz (1998) ont montré que la plupart des réseaux observés dans la nature ne ont un petit diamètre (distance faible d'un point à un autre, comme les « six degrés de séparations » de Milgram), et un coefficient de clustering élevé (Tableau 1)

Tableau 1 : "petits mondes" dans différents domaines du monde réel : relations sociales, réseau électrique et organisation biologique du vivant

	Kevin Bacon G.	W.S.Power Grid	C. Elegans Graph
n nombre de sites (agents)	225 226	4941	282
k connectivité moyenne	61	267	14
L longueur du plus court chemin	3,65	18,7	2,65
C coefficient de Clustering	0,79 ± 0,02	0,08	0,28

Source : Petter Holme Characteristics of Small World Networks : <http://www.tp.umu.se/~holme/seminars/>

- Kevin Bacon Graph : les agents sont des acteurs tirés de Internet movies database (<http://www.imdb.com>) et les liens représentent les acteurs qui ont joués dans le même film.

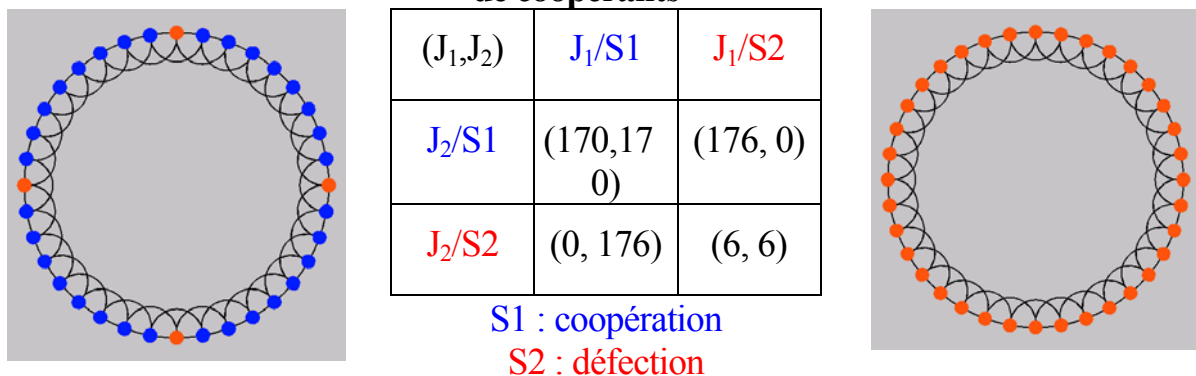
⁸ Dans Moduleco, l'algorithme utilisé diffère sensiblement de celui de WS. Il prend h agents (nœuds), supprime i liens pour chacun de ces agents et reconnecte aléatoirement ces liens à d'autres agents. Le paramètre $q = h \cdot i / n$ joue un rôle similaire à p .

- Western States power Grid : les liens sont les lignes a haute tension du réseau électrique des montagne rocheuses et les agents (sites) les transformateurs, générateurs etc...
- C. Elegans Graph : le réseau de neurones du vers *Caenorhabditis Elegans*

L'exemple suivant, tiré d'un travail en cours de Pajot, Phan illustre le pouvoir des opérations de re-câblage sur les propriétés d'un environnement de décision interactif. Jonard, Schenk, Ziegelmeyer (2000) et Jonard (2002) ont établi pour une large classe de jeux bilatéraux (dont le dilemme du prisonnier) que la stabilité de la coopération dépend largement du degré de régularité de la structure du réseau . Dans l'exemple suivant, les agents jouent itérativement un dilemme du prisonnier bilatéral avec les quatre voisins les plus proches sur un cercle. Entre chaque tour, ils révisent leur stratégie en adoptant celle qui a obtenu le meilleur résultat cumulé dans le voisinage ("*last neighbourhood best payoff*" rule).

Dans ce jeu évolutionnaire, la coopération n'est pas soutenable lorsque le réseau est régulier, mais peut le devenir lorsque l'on redistribue aléatoirement quelques liens, selon un principe de « petit monde ». Pour faciliter la lisibilité, le population a été limitée à $N=36$ agents (32 coopérateurs pour 4 défecteurs). L'objectif de cet exercice est d'évaluer la résistance du réseau contre des défections *accidentelles*. Dans ce but, quatre agents placés symétriquement sur le réseaux sont temporairement forcés à la défection. Quand le réseau est régulier, la défection diffuse rapidement à l'ensemble de la population (Figure 7).

Fig. 7 – Introduction symétrique de la défection (rouge) dans un réseau régulier de coopérants



Dans le cas du réseau régulier, le nombre de défecteurs croît et se stabilise à 100% de la population

Dans certains cas, le fait de modifier la structure en modifiant le voisinage de quelques agents permet de protéger la coopération puisque le comportement non-coopératif ne concerne plus, au final, qu'une fraction de la population.

L'évolution du nombre de défecteurs progresse dans un premier temps et atteint près de 60% de la population, mais la présence d'un lien modifié permet dans un second temps de renverser la tendance. La défection diminue alors pour se stabiliser à 11 % (figure 18). Alors qu'il n'existe, dans ce cas de figure, aucune valeur du gain de coopération inférieure à 176 qui permettrait de maintenir la coopération, le re-

câblage d'un lien suffit pour limiter le pourcentage de la défection totale (ou majoritaire) à seulement un tiers des cas. De plus, dans près de la moitié des cas, la défection se trouve limitée à quatre agents ou moins.

Fig. 8 – Exemple lien rendant le réseau robuste à l'invasion des défecteurs

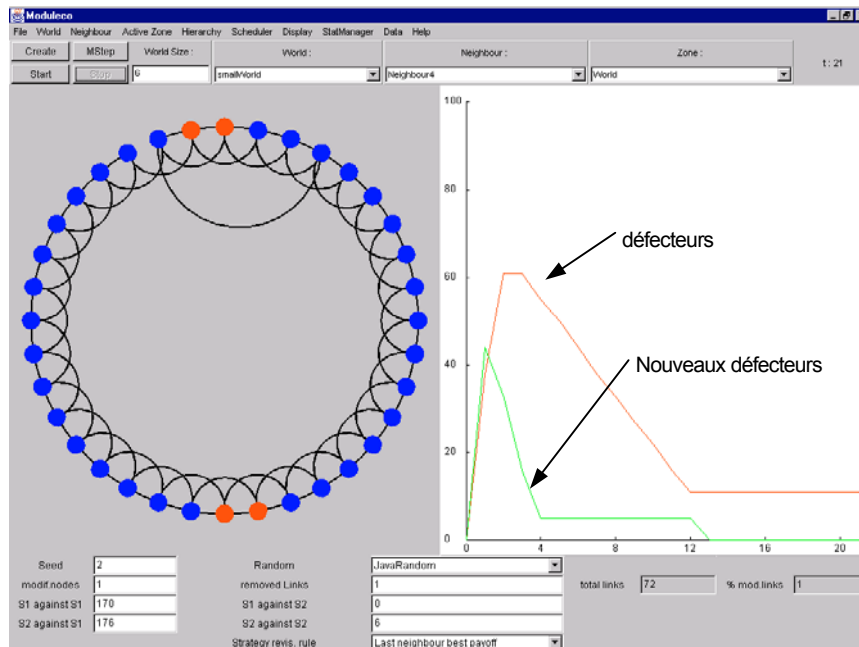
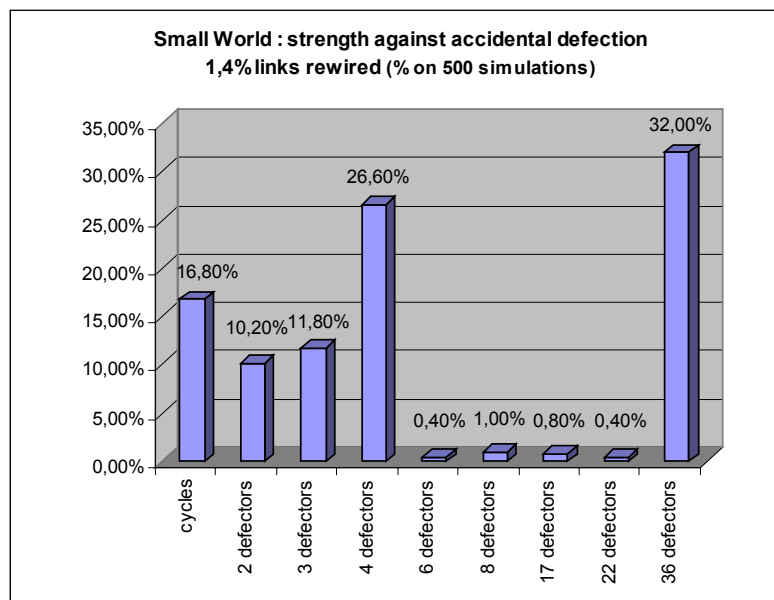


Fig. 9 – Statistical results for 500 simulations



Les premiers résultats des simulations numériques montrent que le pourcentage de coopérateurs stable s'améliore en créant des liens suffisamment longs, c'est-à-dire des relations entre agents issus de voisinages locaux différents. Le meilleur résultat moyen (plus faible pourcentage de défection) est obtenu pour 1 nœud modifié avec 2 liens re-câblés.

2.3. L'analyse macroscopique des dynamiques d'interaction à la lumière de la physique statistique : le cas d'un marché en monopole avec externalité de demande localisée.

(Cette partie sera résumée et réduite dans les versions ultérieures)

A la suite des travaux précurseurs de Föllmer (1974), qui fut le premier (et pendant longtemps le seul) à avoir utilisé explicitement les méthodes de la physique statistique pour formaliser les phénomènes d'interdépendance sociale *localisée* en économie, les méthodes d'analyse des réseaux d'interaction de la physique statistique ont connu un regain d'intérêt au début des années quatre vingt dix. Une synthèse des modèles de choix discrets en situation d'interaction sociale a été réalisé par Durlauf (1997), Brock, Durlauff (1999, 2000), Blume, Durlauf (2001), ci après désignés par BBD.

Cette section cherche à montrer la fécondité de la modélisation multi-agent de l'organisation des marchés et de la simulation pour l'investigation de situations pour lesquels on ne dispose de solutions analytiques que dans certains cas polaires particulièrement simples. Dans ce but, on se base pour le comportement des consommateurs sur le modèle de choix discret le plus simple possible : le choix binaire (Anderson, DePalma, Thisse, 1992). Pour ce qui est de l'organisation du marché, on considère une situation monopole la plus proche possible du paradigme standard. Il s'agit d'un vendeur qui connaît à priori aussi bien la fonction de comportement des agents que la distribution de probabilité du paramètre idiosyncrasique de leur disposition à payer. Contrairement aux modèles stochastiques d'interactions considérés par BBD, où l'utilité des agents comprend un terme aléatoire (« à la Thurnstone »), il s'agit d'un problème de décision interactive « à la McFaden », où les préférences de chaque agents sont déterministes, mais non observables par le vendeur qui se trouverait donc – en l'absence d'externalité entre agents – dans une situation classique de « risque ». Ce modèle et les résultats présentés issus proviennent de travaux en cours par Vannimendus & ali. et Nadal, Phan. Pour replacer ces travaux dans la perspective de ceux de BBD, cf. Gordon, Nadal, Phan (2003)

Du coté des agents.

On considère une population d'agents qui ont à faire un choix binaire ω_i dans l'ensemble $\{0, 1\}$. Les agents maximisent une *fonction de surplus* $V_i(\omega_i)$ que l'on suppose décomposable en une somme de trois termes. Le premier terme contient une disposition à payer déterministe indépendante des phénomènes d'interaction sociale et non observable par un tiers ($h + h_i$). Celle-ci est elle - même décomposable en un terme h commun à toute la population, et un terme idiosyncrasique h_i qui caractérise les préférences de l'agent i . La distribution de la population est elle que la moyenne des h_i est nulle. Le second terme $S(\omega_i, \omega_{-i})$ (où ω_{-i} désigne le vecteur des choix ω_k observés par l'agent dans son voisinage : $k \in \vartheta$) représente des effets externes de

voisinage, tels que les phénomènes d'influence sociale. Le dernier terme $\omega_i.p$ représente la facture de l'agent au prix de marché du bien considéré (p s'il achète, 0 sinon).

$$(1) \quad \max_{\omega_i \in \{0,1\}} V_i(\omega_i) = \omega_i.(h + h_i) + S(\omega_i, \omega_{-i}) - \omega_i.p$$

On désigne par $J_{i,k}$ l'effet marginal de l'influence sociale de l'agent k sur l'agent i . Conformément aux hypothèses de BBD, on considère que ce terme a des propriétés de *complémentarité stratégique* (Bulow, Geanakoplos, Klemperer, 1985, Cooper John, 1988) par rapport aux valeurs observées des choix individuels dans le voisinage ($J_{i,k}$ tous positifs). Formellement si les arguments de la fonction $S(\cdot)$ étaient continus et si cette dernière était C^2 , ceci entraînerait que :

$$(2) \quad \frac{\partial^2 S(\omega_i, \omega_{-i})}{\partial \omega_i \partial \omega_k} = J_{ik} > 0$$

Plusieurs formalisations des effets externes de voisinage compatibles avec cette condition peuvent être utilisées. On retiendra ici un *effet positif multiplicatif* et linéaire d'interaction entre le choix individuel et le choix anticipé.

$$(3) \quad S(\omega_i, \omega_{-i}) = \omega_i \sum_{k \neq i} J_{i,k} \omega_k$$

On peut montrer que cette effet positif exerce une influence marginale équivalente à un « *effet de conformité* » quadratique négatif à la Berheim (1994). Ce dernier est nul lorsque deux agents ne seront pas connectés $J_{i,k} = 0$ ou font des choix similaires ($\omega_i = \omega_k$), négatif sinon.

$$(3 \text{ bis}) \quad S(\omega_i, \omega_{-i}) = - \sum_{k \neq i} \frac{J_{i,k}}{2} . (\omega_i - \omega_k)^2$$

On suppose pour simplifier que les interactions sociales sont homogènes et symétriques : tous les coefficients d'influence sociale sont égaux et normalisés par la taille du voisinage : $J_{i,k} = J_{\vartheta_i} = j/N_{\vartheta_i}$ où N_{ϑ_i} est la taille du voisinage de i . Si l'on considère un agent k pris dans le voisinage de l'agent i ($k \in \vartheta_i$), son influence sociale est J_{ϑ_i} si ce voisin a adopté le bien considéré ($\omega_k = 1$), zéro sinon. L'effet cumulé sur la disposition à payer de l'agent est donc la somme des effets individuels sur le voisinage. Il s'agit donc d'un effet externe proportionnel à la proportion $\eta_i(\omega_{-i}) = \frac{1}{N_{\vartheta_i}} . \sum_{k \in \vartheta_i} \omega_k$ de ses *voisins* qui ont adopté le bien considéré :

$$(2 \text{ ter}) \quad S(\omega_i, \omega_{-i}) = j.\eta_i(\omega_{-i})$$

Les Agents ont donc une disposition à payer linéaire. La fonction de surplus $V_i(\omega_i)$ est positive si l'agent achète une unité du bien ($\omega_i = 1$), nulle sinon.

$$(1\text{bis}) \quad \max_{\omega_i \in \{0,1\}} V_i(\omega_i) = \omega_i (h + h_i + j.\eta_i(\omega_{-i}) - p)$$

On considèrera par convention qu'un agent sera acheteur si son surplus est strictement positif c'est à dire soit : $h + h_i > p$ en l'absence d'externalité, soit : $h + h_i + j.\eta_i(\omega_{-i}) > p$ (dans le cas avec externalité).

Le problème du vendeur et la dynamique d'adoption.

En *situation de risque*, le vendeur connaît parfaitement le comportement *générique* de demande des consommateur, mais il ne connaît pas l'indice personnel de chaque consommateur particulier. . Il connaît cependant la distribution de probabilité de ces indices.

Les agents sont distribués aléatoirement sur le réseau (c'est un champ aléatoire) et les composant idiosyncrasique individuels ε sont indépendants entre eux. Du point de vue du vendeur, ils peuvent être considérés comme une variable aléatoire. On suppose qu'il s'agit d'une distribution paramétrique $F(z)$ de moyenne nulle. Sur cette base, le vendeur pourrait écrire la probabilité conditionnelle d'un choix individuel :

$$(4) \quad \begin{aligned} P_i(\omega_i = 0 | p, \omega_{-i}) &= P_i(\varepsilon_i \leq p - h - j.\eta_i(\omega_{-i})) = F(p - h - j.\eta_i(\omega_{-i})) \\ P_i(\omega_i = 1 | p, \omega_{-i}) &= P(\varepsilon_i + h + j.\eta_i(\omega_{-i}) > p) = 1 - F(p - h - j.\eta_i(\omega_{-i})) \end{aligned}$$

Plus spécifiquement, suivant BBD, on considèrera que $F(z)$ est une loi logistique centrée sur \mathfrak{R} ($E(h_i) = 0$) de même variance pour tous les agents : $V(\varepsilon) = \pi^2/(3.\beta^2)$:

$$(5) \quad P(h_i \leq z) = F(z) = \frac{1}{1 + \exp(-\beta.z)}$$

Sous cette hypothèse, la probabilité conditionnelle d'adoption $P(h_i > z_i) = 1 - F(z_i)$ devient :

$$(6) \quad P_i(\omega_i = 1 | p, \omega_{-i}) = \frac{\exp(-\beta.z_i)}{1 + \exp(-\beta.z_i)}$$

$$\text{avec : } h + j.\eta_i(\omega_{-i}) - p = -z_i$$

Le premier cas polaire correspond à *l'absence d'externalité* ($(\eta_i(\omega_{-i}) = 0)$). Dans ce cas, la probabilité d'adoption n'est plus conditionnelle qu'aux prix. Comme tous les $z_i = p - h$ sont égaux, elle est la même pour tous les agents :

$$(7) \quad P_i(\omega_i = 1 | p) = P(\omega = 1 | p) = \frac{\exp(\beta.(h - p))}{1 + \exp(\beta.(h - p))}$$

Cette probabilité nous donne une courbe classique de demande décroissante et convexe. La probabilité d'achat nous donne également la proportion des acheteurs dans la population :

$$(7 \text{ bis}) \quad \eta = 1 - F(p - h) = P(\omega = 1 | p)$$

L'autre cas polaire correspond à *l'externalité globale*, où les agents sont influencés par la pénétration moyenne dans la population. Ce cas correspond aussi à une *connectivité totale* : « tout le monde est relié avec tout le monde » ; de plus, sous les hypothèses que nous avons faites (homogénéité des $J_{i,k}$, normalisation par la taille du voisinage) il correspond au cas du « champs moyen » des physiciens). Pour un grand nombre N d'agents, le vecteur ω_{-i} est approximativement le même pour tous et l'effet d'influence sociale est quasi-observable par le vendeur, car il correspond à la proportion η des acheteurs dans la population ($\eta_i(\omega_{-i}) \cong \eta$ pour tout i) ; ici encore, la demande globale est égale à la probabilité d'adoption multipliée par le nombre d'agent. Le taux d'adoption est un point fixe de l'équation :

$$(8) \quad \eta = 1 - F(p - j \cdot \eta - h) = \frac{\exp(\beta \cdot (h + j \cdot \eta - p))}{1 + \exp(\beta \cdot (h + j \cdot \eta - p))}$$

L'équation (8) permet de définir le taux d'adoption comme une fonction implicite de p :

$$(9) \quad F(p - j \cdot \eta(p) - h) + \eta(p) = 1$$

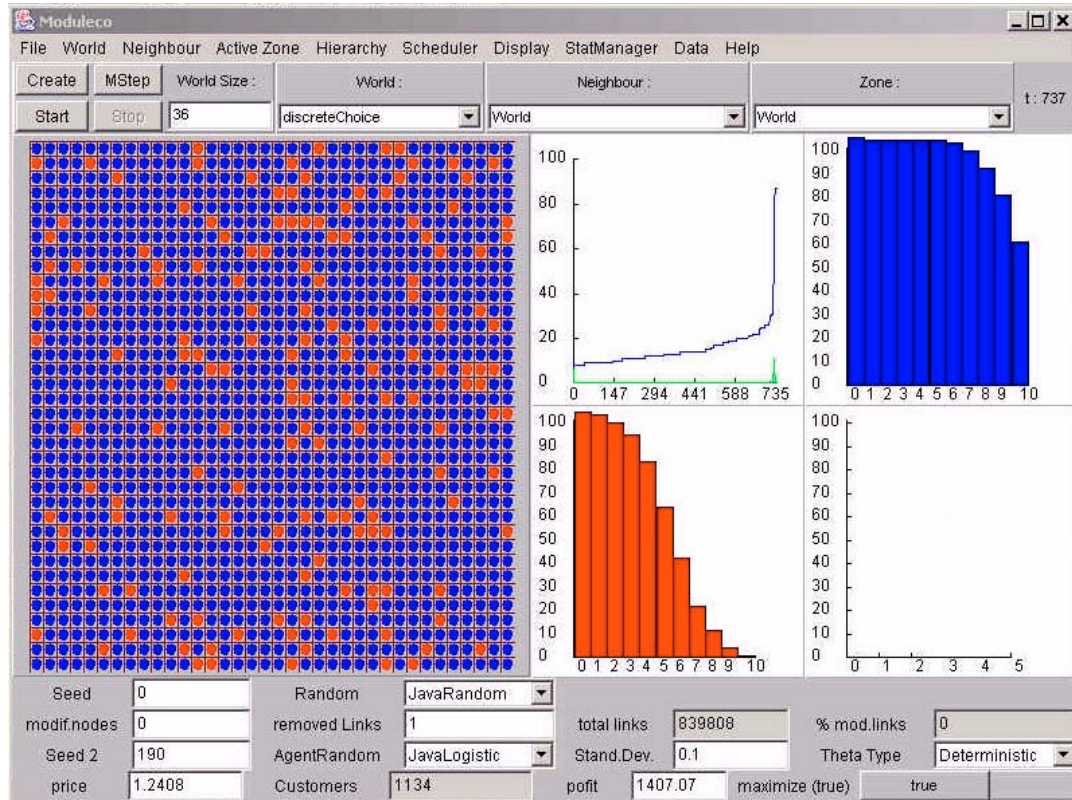
On peut ainsi donner une forme analytique à la demande et calculer numériquement la solution de (8) dans le cas de l'externalité globale pour p donné. Mais même dans ce cas, les comportements dynamiques de la population d'acheteurs face aux prix ne sont pas triviaux. Pour illustrer l'intérêt des investigations multi-agents dans ce cas pourtant simple et très proche de la littérature standard, nous aborderons successivement (1) la dynamique d'ajustement des acheteurs à une baisse des prix, qui permet de mettre en évidence les notions de rupture de symétrie et de transition de phase utilisées par les physiciens et (2) la distribution des prix optimaux en régime stationnaire lorsque la topologie du réseau varie en connectivité et selon des principes des « petits mondes ». Les simulations présentées ci-dessous ont été réalisées pour une population de 36×36 , soit 1296 agents.

Ajustement des acheteurs aux variations des prix

Pour une variation donnée des prix, il est possible d'observer les variations résultantes de la demande, c'est à dire le processus d'équilibration du système de demande face à tous changements extérieurs des prix par le vendeur. On définit un équilibre à prix donné comme une situation où le nombre d'adopteurs reste stationnaire.

Dans la simulation présentée Figure 10, nous avons procédé sur Moduleco à une incrémentation, puis à une décrémentation des prix, (pas de 10^{-4} , sur l'intervalle $[1,20-1,30]$). Les résultats théoriques connus nous permettent de prévoir à $p = 1,25$ une rupture de symétrie. Les résultats les plus spectaculaires ont été observés pour une externalité globale, lorsque tous les agents mettent à jour leurs choix simultanément (Figure 10).

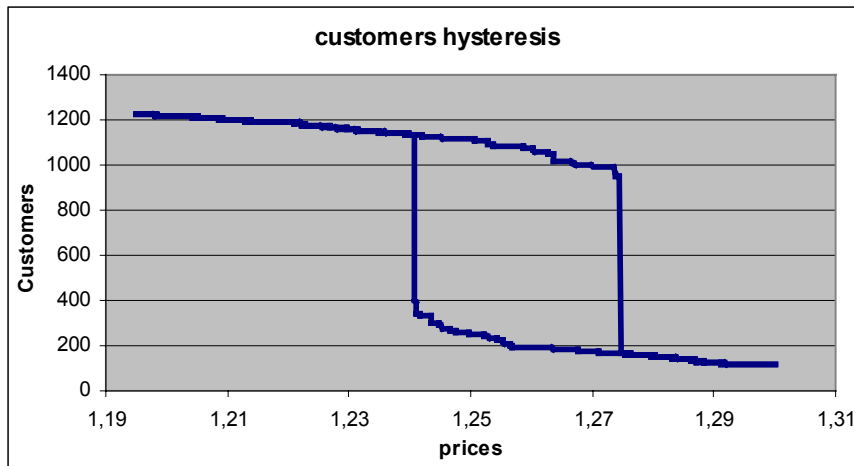
Fig 10 : transition de phase avec externalité globale et activation simultanée des agents



Rupture de symétrie, transition de phase et hystérésis

La figure 11 donne l'ensemble des positions d'équilibres du système de demande pour tous les prix variant par pas de 10^{-4} , sur l'intervalle $[1,20-1,30]$. On observe un phénomène d'hystérésis lors des transitions de phase autour du point théorique de rupture de symétrie $p^s = h + j/2 = 1,25$.

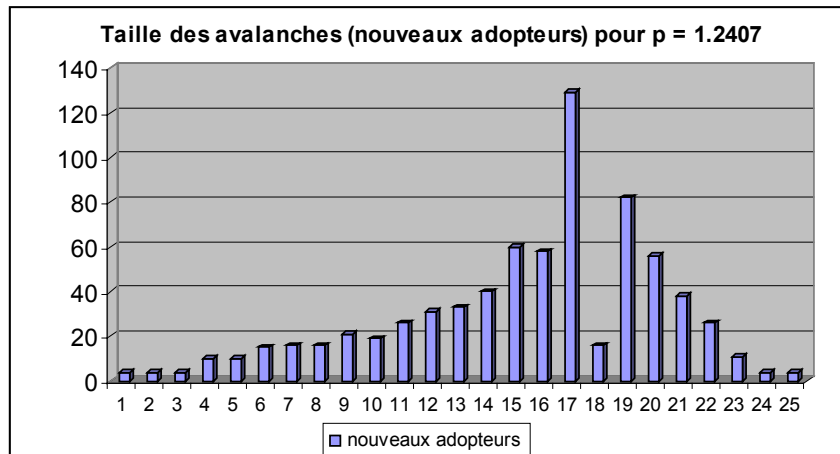
Figure 11 : hystérésis dans la relation prix – acheteurs pour le régime d’activation simultané des agents



Sur la Figure 11, on observe clairement l’asymétrie entre la trajectoire d’équilibre « montante » (à prix décroissants), où une succession d’avalanches apparaissent pour $p = 1.2407$, faisant basculer brutalement le système d’un taux d’adoption de 20% à un taux de l’ordre de 80%.

Lorsque les prix baissent, l’effet des externalités entraîne une forte résistance du système de demande à la baisse. Le seuil de transition de phase se trouve ici à $p = 1,2745$, où le taux d’adoption de la trajectoire d’équilibre passe brutalement de 73% à 12,9%. La figure 12 nous donne la distribution des avalanches dans la branche montante de la transition de phase, pour $p = 1.2407$.

Figure 12 : taille des avalanches à la transition de phase



Le prix optimal du monopole en régime stationnaire : La distribution des prix et sa sensibilité à la topologie du réseau.

On trouve dans la littérature une solution pour le prix optimal du vendeur dans les deux cas polaires de l’absence d’externalité et de l’externalité globale. Après avoir rappelé la forme analytique de ces solutions, on présente les résultats de simulations où le prix optimal du monopole en régime stationnaire a été cherché de manière itérative dans différentes configuration de réseau régulier périodique en dimension 1

(voisinage 2,4,6,8) et dans des configurations intermédiaires entre le réseau régulier et le réseau aléatoire correspondantes (petits mondes). Le Tableau 1 nous montre la variabilité de la distribution des prix et des profits qui augmentent régulièrement avec la connectivité et montent la sensibilité des résultats à la topologie du réseau

Dans le cas de l'externalité globale avec interactions homogènes (le plus simple avec interdépendance sociale) les résultats sont indépendants de la structure du réseau. L'équation (9) nous permet d'exprimer le taux d'adoption comme une fonction implicite des prix, et on peut écrire et résoudre le programme du monopole qui maximise son espérance de profit (on suppose des coûts nuls pour simplifier) :

$$(10) \max_p \Pi(p) = p \cdot (1 - F(p - h - j \cdot \eta(p))) \cdot N$$

Les solutions avec ($j \neq 0$), et sans ($j=0$) externalité sont les points fixes des équations (12) et (13) :

$$(11) p^* = \frac{1 - F(p^* - h - j \cdot \eta(p))}{f(p^* - h - j \cdot \eta(p))} \cdot (1 - f(p^* - h - j \cdot \eta(p)) \cdot j)$$

$$(12) p^* = \frac{1 - F(p - h)}{f(p - h)}$$

Rem : Graphiques a faire (à la place ou en plus du tableau de chiffres)

Tableau 1 : résultats statistiques des simulations : valeur moyenne pour 100 simulations

1296 agents	prix optimal	adopteurs	profit	pénétration	proportion de liens recablés
<i>Pas d'externalité</i>	0,8087	1135	917,91	87,61%	
Neighbour2	1,0259	1239	1 271,17	95,62%	
Neighbour 4	1,0602	1254	1 329,06	96,74%	
Neighbour 4_130x2	1,0725	1250	1 340,10	96,43%	5%
Neighbour 4_260x2	1,0810	1244	1 344,66		10%
Neighbour 4_520x2	1,0935	1243	1 358,86	95,89%	20%
Neighbour 4_780x2	1,0959	1242	1 361,43	95,86%	30%
Neighbour 4_1296 x 2	1,1017	1237	1 362,35	95,42%	50%
Neighbour 6	1,0836	1257	1 361,48	96,96%	
Neighbour 6_130x2	1,0941	1253	1 370,91	96,70%	3%
Neighbour 6_260x2	1,0997	1252	1 376,78	96,61%	7%
Neighbour 6_520x2	1,1144	1247	1 389,05	96,19%	13%
Neighbour 6_780x2	1,1210	1240	1 389,53	95,65%	20%
Neighbour 6_1296x2	1,1308	1241	1 403,03	95,74%	33%
Neighbour 6_1296x4	1,1319	1240	1 403,02	95,65%	33%
Neighbour 8	1,1009	1255	1 381,89	96,86%	
Neighbour 8_130 x 2	1,1049	1251	1 381,92	96,52%	3%
Neighbour 8_260 x 2	1,1169	1249	1 395,43	96,41%	5%
Neighbour 8_520 x 2	1,1306	1245	1 407,20	96,05%	10%
Neighbour 8_780 x 2	1,1370	1243	1 413,27	95,92%	15%
Neighbour 8_1296x2	1,1461	1238	1 419,28	95,56%	25%
Neighbour 8_1296x4	1,1474	1239	1 421,97	95,63%	50%
Neighbour 8_1296x6	1,1498	1238	1 423,84	95,56%	75%

2.3. L'interprétation économique et l'interprétation physique du modèle.

../..

En attendant la version révisée de ce travail le lecteur pourra se reporter a :

Gordon M. B. Nadal J. P., Phan D. (2003) "Statistical Mechanics Approaches in Economics : Suggested Reading and Interpretations" in Bourguine, Nadal (2003)

<http://www.cenecc.ens.fr/EcoCog/Livre>

POUR ORDRE :

3. Réflexions d'un néophyte sur l'apport interprétatif de la modélisation objet dans la réflexion sur la question de l'abstraction (plan)

3.1. L'architecture du framework Moduleco

<http://www-eco.enst-bretagne.fr/~phan/moduleco/>

(schéma UML qui datent un peu)

3.2. Quel est l'apport interprétatif de cette architecture ?

3.3. Retour sur les niveaux d'abstraction : la question ontologique

Bibliographie

- Amaral L.A.N., Scala A., Bathelmy M., Stanley H.E. (2000) « Classes of behavior of small-world networks » ; *cond-mat / 0001458*, 31 janvier.
- Anderson P.W., Arrow K.J., Pines D. eds. (1988) *The economy as an evolving complex system*; Addison-Wesley Pub.Co, Reading Ma.
- Anderson P.W., Stein L. (1983) "broken symmetry, emergent properties, dissipative structure, life: are they related ?" in Anderson P.W ed. *Basic notions of condensed matter physics*; p.263-285.
- Anderson S.P., DePalma A, Thisse J.-F. (1992) *Discrete Choice Theory of Product Differentiation*, MIT Press, Cambridge MA.
- Arthur W.B., Durlauf S.N., Lane D.A. (eds). (1997) ; *The Economy as an Evolving Complex System II* ; Santa Fee Institute, Studies on the Sciences of Complexity, Addison-Wesley Pub.Co, Reading Ma .
- Atlan H. (1979) ; *Entre le cristal et la fumée, essai sur l'organisation du vivant* ; Seuil, Paris.
- Axtell R. (2000) « Effects of Interaction Topology and Activation Regime in Several Multi-Agent Systems » ; *SFI Working Paper N° 00-07-039*, Santa Fe.
- Bak P. (1996) *How Nature Works, The science of self-organized criticality* ; Springer Verlag, N.Y. trad française : *Quand la nature s'organise, avalanches, tremblement de terre et autres cataclysmes*, Flammarion, Paris, 1999.
- Ballot G., Weisbuch G. (2000) eds. ; *Applications of Simulation to Social Sciences* , Hermès, Paris.
- Berthelot J.M. (2001) *Epistémologie des sciences sociales* ; PUF Paris.
- Blume L.E. (1993) « The Statistical Mechanics of Strategic Interaction » ; *Games and Economic Behavior*, 5, 387-424.
- Blume L.E. (1995) « The Statistical Mechanics of Best-Response Strategy Revisions » ; *Games and Economic Behavior*, 11, p.111-145.
- Bonabeau E. (1994) « Intelligence collective ? » in : Bonabeau, Theraulaz (1994) eds., op.cit. p. 13-28.
- Bonabeau E., Dorigo M., Theraulaz G. (1999) *Swarm Intelligence, From Natural to Artificial Systems*, Oxford University Press, New York, Oxford.
- Bonabeau E., Theraulaz G. eds. (1994) *Intelligence collective* ; Hermes, Paris.
- Bourgine P., Bonabeau E. (1998) « Artificial Life as a Synthetic Biology » ; in Kunii, Luciani (1998) eds., *Cyberworlds*, T.L.
- Bourgine P., Nadal J.P. (2003) *Towards a Cognitive Economy* ; Springer verlag (forthcomming)
- Bunge M.A. (1998) *Social Science Under Debate : A Philosophical Perspective* ; University of Toronto Press.
- Dalle J.M. (1997) *La question de l'ordre en économie ; modèles stochastiques d'interaction et de diffusion des innovations technologiques* ; Thèse d'Economie Ecole Polytechnique sous la Direction de R. Salais
- Dalle J.M., Foray D. (1995) « Des fourmis et des hommes ; modèles stochastiques d'interaction et rationalité individuelle active » ; *Cahiers d'Economie et de Sociologie Rurale*, V37 p. 70-92
- Dalle J.M., Foray D. (1998) « Quand les agents sont-ils décisifs (ou négligeables) ? » ; in Callon et ali.. (1998) eds., op.cit. p. 111-131.

- David P.A. (1993) « Dépendance du chemin et prévisibilité des systèmes dynamiques avec externalité de réseaux localisées : un paradigme pour l'économie historique » ; in Foray, Freeman (1993) eds., p. 241-274.
- Degenne A. Forsé M. (1994) *Les Réseaux Sociaux* ; Armand Colin, Paris.
- Douglas Mary (1986) *How Institutions Think*, Syracuse University Press, trad. française : *Comment pensent les institutions* La Découverte -Mauss, Paris, 1999.
- Dupuy J.P. (1988) « Sur la complexité du social » ; in Fogelman-Soulié (1988) (dir).
- Dupuy J.P. (1994) *Aux origines des sciences cognitives* ; La Découverte, Paris.
- Dupuy J.P., Livet P. (1992) « Rationalité située et savoir collectif » ; *Le courrier du CNRS* 79, p. 112.
- Durlauf S.N., Young P. eds. (2001) *Social dynamics* ; The MIT Press, Cambridge Ma.
- Epstein J.M. (1999) « Agent-Based Computational Models and Generative Social Science » ; *Complexity*, Vol.4 N°5, p.41-60.
- Epstein J.M. Axtell R. (1996); *Growing Artificial Societies, Social Sciences from the Bottom Up*, Brooking Institution Press, MIT Press Washington D.C., Cambridge Mass.
- Ferber J. (1997); *Les Systèmes Multi-Agents; vers une intelligence collective*; Inter Editions; *Multi-agent Systems* Addison Wesley Reading, MA.
- Galam S. (2000) « Application of Statistical Physics to Politics » ; july 8, *cond-mat/0004306* April.
- Galam S., Moscovici S. (1991) « Towards a theory of collective phenomena : Consensus and attitude changes in groups » ; *European Journal of Social Psychology*, Vol 21, p. 49-74.
- Galam S., Moscovici S. (1991) « Compromise versus polarization in group decision making » ; *Defense Decision making*, Springer Verlag, p.40-51.
- Galam S., Moscovici S. (1993) « A theory of collective decision making in hierarchical and non hierarchical groups » ; *Russian psy Journal*, P. 93-103.
- Galam S., Moscovici S. (1994) « Towards a theory of collective phenomena : II conformity and power » ; *European Journal of Social Psychology*, 24, p. 481-495.
- Galam S., Moscovici S. (1995) « Towards a theory of collective phenomena : III Conflicts and source of power » ; *European Journal of Social Psychology*, 25, p. 217-229.
- Gilbert N. (1995) « Emergence in social simulations » ; in Gilbert, Conte (1995) op.cit. p. 114-156.
- Gilbert N., Conte R. eds. (1995) *Artificial Societies : The Computer Simulation of Social Life* UCL Press London.
- Gilbert N., Troitzsch K.G. (1999) ; *Simulation for the Social Scientist* ; Open University Press, Buckingham.
- Gordon M. B. Nadal J. P., Phan D. (2003) "Statistical Mechanics Approaches in Economics : Suggested Reading and Interpretations" in Bourguine, Nadal (2003)
- Granovetter M.S. (2000) *Le marché autrement, les réseaux de l'économie* ; Col. « Sociologie Economique » Desclée de Brouwer, Paris.
- Heudin J.C. (1998) *L'évolution au bord du chaos* ; Hermes, Paris.
- Hicks J. (1979) *Causality in Economics* ; Basic Books Inc. pub. New York.
- Hodgson G.M. (2001) *How economics forgot history. The problem of historical specificity in social science* ; Routledge, London, New York.
- Hors I. (1995) « Des modèles de transition de phase en économie ? » ; *Revue Economique*, p. 817-826.
- Kirman A. (1997a) « The Economy as an Interactive System » in Arthur, Durlauf, Lane eds., (1997) p. 491-531.
- Kirman A. (1997b) « The Economy as an Evolving Network » ; *Journal of Evolutionary Economics*, 7, p.339-353.

- Lane (1993) « Artificial worlds and Economics part I & II » ; *Journal of Evolutionary Economics*, 3 p.89-107, p.177-197.
- Langton C.G. ed. (1989) *Artificial life* ; Addison-Wesley, Redwood City Ca.
- Langton C.G. ed. (1995) *Artificial life: an overview* ; Col. « Complex adaptive systems », MIT Press, Cambridge
- Lesourne J. (1991) *Economie de l'ordre et du désordre* ; Economica, Paris.
- Lesourne J., Orléan A. eds. (1998) *Advances in Self-Organization and Evolutionary Economics* ; Economica, Londres Paris.
- Medinger C. (1994) *Science économique : questions de méthode* ; Vuibert, Paris.
- Jean Pierre Nadal, Denis Phan, (2002) « L'influence des structures résilaires sur l'apprentissage social dans un marché en monopole : l'apport des méthodes de la physique statistique et de la simulations multi-agents avec Moduleco »
- Nelson R.R. (1994) « The Co-evolution of Technology, Industrial Structure and Supporting Institutions » ; *Industrial and Corporate Change*, 3/1 p.47-64.
- Newman M.E.J Palmer R.G.. (1999) « Models of Extinction : A Review » mineo, Santa Fe Institute, 49 p, *Submitted to Philosophical Transactions of the Royal Society*.
- Newman M.E.J. (2000) « Small Worlds, the Structure of Social Networks » mineo, *Santa Fe Institute*, 9 p.
- Nicolis G., Prigogine I. (1989) *Exploring Complexity : An Introduction* ; trad. française : *A la rencontre du complexe* ; Presses Universitaires de France, Paris 1992.
- Orléan A. (2003) « Le rôle des croyances sociales en Economie » ; in Bourguine, Nadal eds. (2003)
- Pajot S. (2001) *Percolation et économie* ; Thèse inédite de doctorat d'économie sous la direction de Denis Bouget, Université de Nantes, octobre.
- Phan (2003) "From Agent-Based Computational Economics towards Cognitive Economics" in *Bourguine P., Nadal J.P. eds. (2003) Towards a Cognitive Economy* ; à paraître en 2003 chez Springer Verlag
- Phan D., Piatecki C., Beugnard A. (2000) « Local and global learning on virtual distributed market modelled as a multi-agent system » ; *WEHIA 2000 - 5TH Workshop on Economics with Heterogeneous Interacting Agents* Marseille, June 15th to 17th
- Phan D., Beugnard A., (2001a) « Moduleco, a modular multi-agent platform, designed for to simulate markets and organizations, social phenomenons and population dynamics » ; *CD Rom-Ecole CNRS d'Economie Cognitive*, Porquerolles, 25 Septembre - 5 octobre 2001.
- Phan D., Beugnard A., (2001b) « Moduleco, a multi-agent modular framework for the simulation of network effects and population dynamics in social sciences, markets, & organisations » ; *Approches Connexionnistes en Sciences Economiques et de Gestion*, 8^o rencontres internationales Rennes IGR, 22-23 novembre.
- Ricœur P. (1965) *De l'interprétation* ; Col. « L'ordre Philosophique », réed. Col. « Points Essais » N° 298, Seuil, Paris 1995.
- Ricœur P. (1977) « Expliquer et comprendre. Sur quelques connexion remarquables entre la théorie du texte, la théorie de l'action et la théorie de l'histoire » ; *Revue philosophique de Louvain*, tome 75, février p.126-147.
- Ricœur P. (1983) *Temps et Récit, tome I. L'intrigue et le récit historique* ; Col. « L'ordre Philosophique », réed. Col. « Points Essais » N° 228, Seuil, Paris
- Ricœur P. (2000) *La mémoire, l'histoire, l'oubli* ; Col. « L'ordre Philosophique », Seuil, Paris.
- Schelling T.S. (1969) « Models of Segregation » ; *American Economic Review, Papers and Proceedings*, 59-2 p. 488-493.

- Schelling T.S. (1971) « Dynamic Models of Segregation » ; *Journal of Mathematical Sociology*, 1 p. 143-186.
- Schelling T.S. (1978) *Micromotives and Macrobehavior* ; W.W. Norton and Co, N.Y. ; trad française : *La tyrannie des petites décisions* ; Presses Universitaires de France, Paris 1980.
- Schuster H.G. (2001) *Complex Adaptive Systems, An Introduction*; Scator Verlag, Saarbrücken.
- Sichman J., R. Conte, and N. Gilbert, (eds.), (1998) *Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation*, Berlin, Springer-Verlag.
- Sugden R. (1989) « Spontaneous Order »; *Journal of Economic Perspectives*; 3/4, p85-97.
- Tesfatsion L. (1997) « How economists can get alive » in Arthur, Durlauf, Lane (1997) eds. op. cit.
- Tesfatsion L. (2001) “Agent-Based Computational Economics: A Brief Guide to the Literature” in Michie J. (ed.), *Reader's Guide to the Social Sciences, Volume 1*, Fitzroy-Dearborn, London.
- Tesfatsion L. (2002a) “Economic Agents and Markets as Emergent Phenomena”; *Proceedings of the National Academy of Sciences U.S.A.*, Vol. 99, Suppl. 3, p. 7191-7192.
- Tesfatsion L. (2002b) “Agent-Based Computational Economics: Growing Economies from the Bottom Up”; *Artificial Life*, Volume 8, Number 1, 2002, pp. 55-82, published by the MIT Press.
- Tesfatsion L. (2002c) “Agent-Based Computational Economics” *Economics Working Paper No. 1*, Iowa State University, Revised July 2002.
- Theraulaz G., Spitz F. (eds) (1997) *Auto-organisation et comportement* ; Hermes, Paris.
- Vannimenus J., Nadal J.P., Phan D. (2002) « Economic models of discrete choice with externalities: properties derived from random field Ising Model” Work in progress (draft).
- Varela F. (1979) *Principles of Biological Autonomy* ; Elsevier, North Holland, N.Y. ; trad. française : *Autonomie et Connaissance*, Seuil, Paris.
- Varela, F.J., Bourgine P. eds. (1992) *Towards a Practice of Autonomous Systems* ; Bradford Book MIT Press Cambridge.
- Vriend N.J. (2000) « An illustration of the essential difference between individual and social learning, and its consequences for computational analyses » ; *Journal of Economic Dynamics & Control* ; 24 p. 1 -19.
- Walliser B. (2000) *L'économie Cognitive* ; Odile Jacob, Paris.
- Watts D.J. (1999) *Small Worlds, the Dynamics of Networks between Order and Randomness* ; Col. « Princeton Studies in Complexity », Princeton University Press., Princeton.
- Weisbusch G. (1989) ; *Dynamique des Systèmes Complexes ; une introduction aux réseaux d'automates* ; InterEditions / CNRS, Paris.
- Wilhite A. (2001) ; Bilateral Trade and « Small-World » Networks ; *Computational Economics* 18 p p.49-64.

Informatique, simulacre et simulation

Francis ROUSSEAU

Université de Reims, IRCAM-CNRS

tél. 01 46 33 60 03

20, rue de Condé, 75006 Paris

francis.rousseau@ircam.fr

Un ordinateur est une *machine de Turing* particulière, et la conception d'un programme informatique interactif vise la réalisation d'*agents artificiels coopératifs* susceptibles d'être investis d'esprit par des utilisateurs humains.

Ici, le terme 'agent artificiel' ne renvoie pas aux agents de *la programmation par objets* connus des programmeurs, mais bien davantage à une métaphore de sens commun. Selon l'intuition radicale de Turing en effet, l'investissement d'esprit se déploie par le *dialogue*, qui seul ouvre à la personnification d'une altérité : le propre d'un sujet, c'est de reconnaître la subjectivité de l'autre.

L'investissement de *confiance* d'un dispositif artificiel peut certes s'établir sur la base d'une *interaction* fruste, comme celle qui caractérisait les premiers programmes de calcul, lorsqu'un prompt apparaissant sur l'écran constituait à la fois une invitation à faire sens du résultat précédemment affiché et une nouvelle disposition de la machine à communiquer. La métaphore dialogique est ici celle de l'oracle omniscient, omniprésent et, pourvu que les formes rituelles de la consultation soient scrupuleusement respectées, idéalement rationnel. La puissance évocatrice de cette métaphore ancestrale est telle qu'elle noue implicitement l'attention, l'intention et la confiance de l'utilisateur venu consulter.

Cependant, *passer pour avoir de l'esprit* n'est pas ordinairement attribué aux artefacts. Les informaticiens le savent bien, qui dotent leurs machines en réseau de programmes interactifs inspirés de métaphores de la présence et de la connaissance toujours plus

ingénieuses, dans le but d'ouvrir ce mystérieux pouvoir à leur réalisation.

Aussi la programmation entretient-elle un rapport essentiel et natif avec *la simulation*, *indépendamment* du fait que l'exécution du programme réalise ou non *une simulation de* tel ou tel phénomène (dans cette phrase même, 'simulation' évoque concurremment la tragédie grecque et l'art de la guerre d'une part, les automates de Vaucanson et les modèles numériques de l'autre).

Il convient cependant de mettre en question cette prétendue indépendance.

1. Le paradoxe du comédien

Considérons le 'paradoxe du comédien' écrit par Diderot en 1773. Sous forme de dialogue, Diderot pose la question : la nature, sans l'art, peut-elle former un grand comédien ? Le premier interlocuteur (Diderot lui-même) arrive vite à l'essentiel du dialogue; pour lui les qualités essentielles d'un bon comédien sont le *jugement* et la *pénétration*; il n'a nul besoin de *sensibilité*; bien mieux, la sensibilité peut lui être contraire.

Est-il nécessaire de le prouver ? Le jeu d'un acteur sensible, ' qui joue d'âme ', serait inégal; celui qui ' joue d'étude, de réflexions ' se forme un modèle idéal du rôle, d'après lequel tout sera mesuré, combiné, appris dans sa tête. Mlle Clairon réalise le type de la comédienne dont le jeu est réglé par ce modèle idéal; Mlle Dumesnil, au contraire, ne fait à l'art qu'une place très petite; elle s'abandonne à la nature, à *l'enthousiasme*.

Théorie qui pourrait s'appliquer aux grands poètes, qui sont les êtres les moins sensibles.

Voici une série de constatations susceptibles d'étayer cette thèse, selon Diderot.

- il s'opère, dans le grand acteur, un dédoublement : il agit sur la scène sans rien sentir; il n'est pas le personnage qu'il joue, mais il le joue si bien que vous le prenez pour tel; l'illusion n'est que pour les spectateurs. Le vrai, sur la scène, c'est la conformité des

actions, des discours, de la figure, de la voix, du mouvement, du geste avec un modèle idéal imaginé par le poète et souvent exagéré par le comédien. Les conventions sont utiles et même indispensables au théâtre : on ne meurt pas sur la scène comme on meurt en réalité. La nature a des moments sublimes; encore faut-il les saisir de sang-froid;

- c'est dans la vieillesse, quand ils ont acquis une longue expérience, que les acteurs sont les meilleurs; la tête est plus calme, l'âme se possède; mille petits faits montrent que, loin d'être possédé par son rôle, l'acteur le possède. Garrick était capable de passer sans transition d'une scène de comédie à une scène de tragédie. Il en est de même dans la vie. L'homme sensible obéit aux impulsions de la nature, et ne rend que le cri de son cœur; quand arrive que, lorsque le comédien s'éveille en nous, nous obtenions ce que la sincérité ne nous avait pas permis d'obtenir; un moyen de jouer petitement, mesquinement, c'est d'avoir à jouer son propre caractère. Le propre du comédien consiste, au contraire, à sortir de son propre caractère et à copier tous les autres. Mlle Clairon avait imaginé un grand fantôme et s'y conformait avec génie, si bien qu'en l'entendant dans une de ses pièces, Voltaire s'écriait : ' Est-ce bien moi qui ai fait cela ? ' Après maintes digressions, Diderot, par la bouche du premier interlocuteur, définit ainsi le comédien : ' Un grand comédien est un pantin merveilleux, dont le poète tient la ficelle et auquel il indique la véritable forme qu'il doit prendre ' ; dans la vie courante, les comédiens auxquels on prête tant de sensibilité, en montrent peu. On les voit souvent rire en dehors de la scène, on les voit rarement pleurer. En somme, les caractères ne sont si bien rendus par les comédiens que parce qu'eux-mêmes n'en ont aucun. Grands sur la scène, ils sont petits et bas dans la société : et si la profession de comédien n'est ni honorable ni honorée (sic), le fait est imputable aussi à l'état général des mœurs.

2. Simulation et informatique : le champ opératoire

L'informatique est un *champ disciplinaire* qui n'existait pas avant la seconde Guerre mondiale et qui fait néanmoins carrière polymorphe et

fulgurante aujourd'hui, conférant le rang de *phénomène de société* notoire à son développement tentaculaire. 'Nouveauté disciplinaire' et 'percolation spectaculaire des usages' tendraient ainsi à caractériser l'informatique comme ayant nativement partie liée avec son déploiement spécifique.

Aussi la question ' Qu'est-ce que l'informatique ? ' a-t-elle pulvérisé en une myriade de réponses pratiques et de préconisations tactiques, siégeant au lieu même des expérimentations singulières. Manifestement, l'informatique invite davantage à des mises en œuvres innovantes et créatives liées à des domaines d'activités humaines particulières qu'à des considérations abstraites sur son essence. Et il semble bien qu'on 'n'y comprenne quelque chose' en informatique qu'à la seule condition d'en maîtriser une région technologique ou d'en coproduire un secteur de marché.

Cela tient-il à *l'immaturité passagère* de la discipline scientifique, encore incapable de synthétiser son individualité ?

Il est vrai que cette discipline scientifique, mal détournée de sa ganguine originaire, reste encore fortement soumise aux contingences de son avènement : et les lectures épistémologiques de l'informatique demeurent rares, fragmentaires et cantonnées, quand la thématization scientifique se démêle malaisément des luttes institutionnelles qui en tracent âprement les figures, et que la cartographie technologique se confronte à l'explosion des marchés pour se confondre avec leur diversification.

Cela tient-il à la forte *variété des applications* possibles des technologies de l'information et de la communication, que leur mobilisation accélérée n'est pas encore parvenue à saturer ?

Il est vrai que les prégnantes Nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC) transforment nos pratiques du commerce, du service, de l'école et de la démocratie, le phénomène de société tendant à s'autonomiser de son sol scientifique pour devenir l'enjeu disputé de politiques industrielles, commerciales et culturelles, voire éducatives ou familiales, sectorisant toujours davantage les applications informatiques en les dédiant à des secteurs d'activité.

Et si cela tenait à l'informatique de manière bien plus profonde qu'il n'y paraît, pour en constituer un trait essentiel et radical, que le sens commun aurait spontanément intuitionné ? L'informatique ne serait pas seulement un ensemble de pratiques humaines, mais également une *interprétation* des pratiques humaines.

La question mérite d'être posée dès les prémices d'un travail philosophique en informatique car, par-delà les options méthodologiques qu'elle implique, elle conditionne le devenir même de l'investigation en prescrivant son mode d'engagement.

En effet, oublier que l'informatique interprète les pratiques humaines reviendrait à tenter d'établir la vision synthétique d'une discipline en faisant effort pour en rassembler les manifestations éclatées sous l'égide d'un département scientifique, sans avoir maîtrisé le risque de ne parvenir qu'à ajouter un peu à la confusion épistémologique.

Une telle entreprise, en imputant à l'avance tout échec à *l'immaturité* disciplinaire, participerait en définitive à la consolidation de la posture théorique dominante : l'échec résiderait définitivement sous la responsabilité de l'impatience, *faute d'avoir su différer* la synthèse scientifique jusqu'à une hypothétique maturité que finirait toujours par conférer 'le recul' (cf. le 'Ferdydurke' de Gombrowicz).

Certains contournent adroitement la difficulté en préconisant de ne jamais prendre le risque de normer les possibilités créatrices de ce nouvel univers qu'est l'informatique, la priorité étant selon eux d'éveiller la vocation des pionniers et de motiver les créateurs de valeur et d'emploi.

Mais convenons que la raison philosophique rejoint ici la stratégie, et que s'efforcer de synthétiser *hic et nunc* le champ disciplinaire *avec* le phénomène de société NTIC sous une spécification scientifique relèverait d'un projet utopique et finalement dogmatique, qui n'éclairerait pas nécessairement ceux, et ils sont de plus en plus nombreux, qui souhaitent mieux *comprendre* l'informatique.

Une fois admis que la synthèse thématique n'est pas la méthode appropriée, reste à décider quelle approche mobiliser pour contribuer à une meilleure intelligibilité de l'informatique, de ses enjeux et de ses possibilités, en conférant un statut philosophique à l'investigation.

3. Une approche inspirée par Hans Jonas

Lorsque Hans Jonas cherche à élaborer une biologie philosophique, il est confronté à un problème de méthode assez voisin de celui que nous venons d'évoquer, alors même que la biologie scientifique et l'existentialisme phénoménologique se combattent sur la question de la vie sans se livrer jamais bataille concrète, faute de théâtre d'opérations possible (cf. l'ouvrage 'Le phénomène de la vie' pour un argumentaire plus précis).

Et c'est en organisant tel ou tel combat singulier, dont le périmètre a priori n'est pourtant pas déterminé ni les règles établies parfaitement, que le dépassement se dessine, autour de concepts-clés intuitionnés par l'investigateur comme permettant précisément cela (c'est ainsi que pour Hans Jonas, le métabolisme est un de ces concepts-clés).

Quant à nous, il nous faut mobiliser notre expérience d'informaticien pour trouver le ou les *concepts-clés* qui ouvriront à une compréhension philosophique de l'informatique, sur le mode de la fertilisation croisée et *réciroque*. En d'autres termes, il nous faut exhiber le vis-à-vis conceptuel de l'informatique qui s'impose, sans présumer de son lieu de résidence actuel, qu'il soit dans l'espace circonscrit par les descriptions habituelles de l'informatique ou hors de celui-ci.

Prenons acte des candidatures spontanées : La notion de programme ? La notion d'algorithme ? La notion de modèle exécutable ? La théorie de la calculabilité ? La notion d'interaction personne-ordinateur ? L'intelligence artificielle ? La représentation des connaissances et l'hypothèse du 'niveau des connaissances' d'Alan Newell ? Le fameux test imaginé par Alan Turing ? Un programme de recherche devrait sans doute exposer toutes ces notions, mais il est de toute façon nécessaire de pressentir les concepts-clés, et si possible de façon

engagée, car ils constitueront les biais autour desquels l'investigation s'enracinerait et se déploierait.

L'enquête peut tout naturellement commencer par interroger la notion de *programme informatique*.

Les programmes informatiques sont des textes interprétés par les programmeurs qui les écrivent mais ils sont aussi, de façon homonyme bien qu'en un sens très différent, interprétés par d'autres programmes qui les réalisent ultimement comme calcul effectif.

C'est ainsi que des modèles formels, à condition de posséder certaines propriétés, peuvent être opérationnalisés par le truchement d'un ordinateur, cette machine qui concrétise la machine abstraite de Turing dans une architecture physique du type de celle proposée par Von Neumann.

Ecrire des programmes informatiques est une activité soumise à cette double contrainte de rédaction, faisant droit d'une part à la relecture critique par un programmeur, et exigeant d'autre part le respect de règles syntaxiques et algorithmiques garantissant la légalité du programme en phase de compilation et sa terminaison en phase d'exécution.

Reste que cette double contrainte est surdéterminée par la *visée modélisatrice du programmeur*, qui prétend produire un artefact dont l'opérationnalisation modélise un phénomène plus ou moins complexe.

Ainsi, si programmer consiste à la fois à produire un artefact et à modéliser un phénomène, l'art de la programmation consiste à penser ces deux activités comme une seule, consistant à réaliser des modèles effectifs de phénomènes donnés, de façon prédictive et traçable.

Et les 'hackers', ces mordus de la réalisation de programmes, sont sans doute fascinés par la possibilité de faire converger tant de contraintes hétérogènes au travers d'une activité vécue comme cohérente, spécifique et irréductible.

Mais revenons sur la programmation comme cadre scientifique théorique. Certains remarqueront à juste titre que beaucoup de

modèles mathématiques ne sont pas ‘computationnels’, au sens où ils sont théoriquement non explicables par des algorithmes qui terminent.

D'autres ajouteront que le caractère formel d'un ensemble de descriptions ne manifeste en rien l'aptitude de cet ensemble à faire fonction de modèle utile.

D'autres encore s'étonneront que des programmes interactifs très simples semblent modéliser adéquatement des activités complexes avec une facilité déconcertante et un succès incontesté, comme ceux qui implémentent la *métaphore* du bureau, des dossiers et des fichiers à usage des employés de bureau.

Ils ont également raison, et Turing lui-même le présentait en proposant son fameux test qui devait marquer l'histoire de l'informatique : l'interactivité personne-ordinateur est une sorte de dialogue allégorique, d'un genre nouveau, dont la maïeutique attend toujours son Socrate.

Mais si les ordinateurs ne peuvent opérationnaliser que des formalismes computationnels et nous condamnent ainsi à ne rien dire des autres, si les modèles utiles ne sont pas nécessairement formels et si les descriptions formelles ne sont pas nécessaires pour élaborer un modèle interactif utile, comment fixer un cadre théorique robuste pour décrire la programmation ?

Cela exige notamment de comprendre comment l'interactivité du dialogue personne-ordinateur facilite l'émergence de modèles utiles à partir d'effectivités computationnelles parfois très simples, l'ordinateur apparaissant comme un interlocuteur artificiel dont la bonne volonté systématique est telle qu'elle incite l'utilisateur à la persévérance, et le conduit subrepticement à opérer une personnification de la machine.

Si les programmes informatiques (nécessairement formels) peuvent parfois donner lieu à des simulations qui participent d'une certaine façon (pour l'heure mystérieuse) à l'effectivité de modèles utiles, c'est parce qu'un modèle utile est *utile à quelqu'un*, et que le phénomène à modéliser n'est pas extérieur à l'usager du modèle.

Des symboles censés dénoter des connaissances élémentaires sont manipulés sans présomption de leur sens par des procédures se réduisant ultimement à du calcul, mais leur interprétation contextuelle, réputée possible, reste à la charge de la personne : tout le problème consiste alors à faire en sorte que le 'réputé possible' ne se démente pas, la machine étant ainsi supposée proposer du sens nouveau par variation contextuelle raisonnable (logique) du sens ancien.

C'est ainsi par exemple que la répétition du *même*, si facile à produire à l'aide d'algorithmes, peut se manifester à l'usage comme *coopération interactive*, si tant est que la personne reconsidère à nouveaux frais la dernière production de la machine pour en paramétrer la prochaine. C'est de cette façon que fonctionnent actuellement la plupart des outils de recherche documentaire, le système artificiel donnant plus à penser qu'il ne prétend penser.

Les programmes informatiques sont souvent caractérisés par les programmeurs comme par les usagers au travers de la simulation que leur exécution est censée réaliser. On en conviendra, la notion de *simulation* est candidate à permettre la mise en perspective à la fois de la discipline *et* du phénomène informatiques : elle peut constituer légitimement, à ce titre, le concept clé que nous cherchions.

Non pas que le lieu de la simulation soit suffisamment lumineux pour éclairer de lui-même le clair-obscur informatique : la référence à la simulation, bien que traversant toute la philosophie et constituant un objet vénérable à ce titre, n'en est pas plus claire pour autant quand elle en vient à rencontrer singulièrement l'informatique.

Au contraire, en rapprochant les deux notions également problématiques d'informatique et de simulation, nous comptons bien tirer profit philosophique au lieu exact de la rencontre, avant d'en tirer conséquence alentour. En d'autres termes, en les confrontant là même où elles prétendent se donner rendez-vous spontanément, nous visons le dépassement des cadres habituels d'appréhension de l'informatique et, respectivement, de la simulation.

La méthode proposée signe l'approche envisagée : il s'agira d'un *processus constructif de modélisation*, alimenté par deux points de vue

contradictoires. Et il faudra redonner à la simulation toute sa charge de sens commun (simuler, c'est feindre, faire semblant, faire comme si, faire paraître comme réelle une chose qui ne l'est pas, offrir l'apparence, imiter, déguiser un acte sous l'apparence d'un autre), pour comprendre chemin faisant en quoi la simulation informatique différerait de la simulation au sens que Diderot donne à ce terme dans son texte 'paradoxe du comédien' ou que Fink lui donne dans 'Le jeu comme symbole du monde'.

Notre enquête sur la simulation nous conduira ainsi de la tragédie grecque à la question du *continu* et du *discret*, en passant par l'art de la guerre et les automates de Vaucanson.

4. L'enquête préliminaire

On vise l'éclairage réciproque de l'informatique en tant qu'elle constituerait une *possibilité inédite* de réaliser des simulations, et de la simulation en tant qu'elle se manifesterait singulièrement en *inspirant le développement* de l'informatique. Au fond, il s'agit de décider si les simulations informatiques inaugurent un genre nouveau de simulation.

Pour parvenir à cette fin, il faudrait mettre au point un mode de commentaire de l'informatique qui ne soit ni strictement historique, ni strictement scientifique, ni strictement technologique, se rapprochant sans doute de *l'herméneutique matérielle* proposée par Bruno Bachimont dans sa thèse de doctorat d'épistémologie.

Ici, on aborde successivement quelques lieux constitutifs de l'informatique, autant pour mettre au point la méthode que pour familiariser le lecteur avec quelques-uns des fondements révélateurs de l'épopée informatique : l'intelligence artificielle (IA), les modèles multiagents, la notion d'ontologie en acquisition des connaissances, les interactions personne-ordinateur, ainsi que l'informatique multimédia.

L'intelligence artificielle et ses métaphores

L'intelligence artificielle a constitué d'emblée l'enjeu du programme informatique originel parmi les Alliés vainqueurs de la seconde Guerre mondiale, qui souhaitaient se donner les moyens stratégiques de gagner la guerre froide en s'appuyant sur des recherches

multidisciplinaires en philosophie analytique, en linguistique, en théorie de l'information, en psychologie cognitive et en mathématique.

L'organisation du programme ressemblait à celle qui avait permis de triompher à Los Alamos en parvenant à manufacturer la bombe atomique, concentrant les chercheurs, les moyens financiers et les effets d'annonce stimulants. Au fond, 'intelligence' renvoie au *renseignement* comme le signifie le vocable anglo-saxon.

Il s'agissait de prolonger les brillantes prestations de décodage, par les équipes de Turing, des messages échangés par les bâtiments sous-marins de l'Axe après cryptage par ENIGMA. Pour cela, il fallait maîtriser l'explosion combinatoire caractéristique de la Théorie des jeux, traiter automatiquement le Langage naturel écrit et parlé, surmonter les difficultés de la Reconnaissance des formes par des moyens ingénieux et adaptés aux problèmes spécifiques de l'acoustique, de la vision ou du toucher.

Des langages de programmation allaient voir le jour (LISP inventé par McCarthy en 1956), ainsi que des systèmes de résolutions de problèmes à partir de descriptions formelles (le 'General Problem Solver' de Simon et Newell en 1958), des démonstrateurs automatiques de théorèmes qui allaient devenir les fameux Systèmes experts, sans oublier des Systèmes apprentis utilisant parfois des Logiques étendues ou spécifiques.

Au fond, l'intelligence artificielle institue la discipline qui vise la conception de programmes manipulant des symboles interprétables en langue. Ces symboles sont investis de sens dès leur introduction dans leur contexte originel. Les programmes manipulent formellement ces symboles, à l'aide de modèles logiques, et leur réinterprétation en langue dans le nouveau contexte conduit heuristiquement à une suggestion plausible de sens.

Lorsque les manipulations sont interactives et que les dialogues de contrôle font mine de porter sur le sens interprétatif des symboles, l'investissement d'esprit du programme par l'utilisateur peut surprendre (cf. l'expérience de Weizenbaum avec le programme ELISA).

Les résultats furent intéressants au plan technologique et stimulants au plan scientifique, même si les promesses initiales n'ont jamais été tenues. Plus étonnant, la démarche a rencontré d'importantes préoccupations de la philosophie analytique et a suscité des propositions et des controverses en Théorie de l'esprit, dépassant parfois le périmètre de la science cognitive naissante.

Cependant, l'intelligence artificielle a toujours privilégié l'expression langagière, au détriment de l'impression sensorielle, et reste typiquement bien impuissante devant le projet de décrire en langue l'impression ressentie par un auditeur à l'écoute d'une pièce de musique : car la musique, exprimait déjà Aristote, est destinée à être écoutée plutôt que raisonnée.

C'est ainsi que le couple informatique-philosophie analytique a fini par rencontrer la philosophie continentale, aux Etats-Unis même, sous le visage de la philosophie de Heidegger et de l'herméneutique de Gadamer. Il faudra en particulier repasser les critiques adressées par Hubert Dreyfus et Terry Winograd à l'Intelligence artificielle dans les années soixante-dix : le choc fut très violent et les chercheurs scientifiques occidentaux, heurtés de plein fouet par des controverses sans avoir toujours la culture philosophique suffisante pour les circonscrire, ont souvent fait effort pour redéfinir leur champ disciplinaire.

Principe de rationalité, objets, agents et acteurs

Au plan de la méthode, la programmation a d'abord été marquée par la scolastique : l'écriture des programmes était subordonnée à leur conception globale puis détaillée (on peut faire le parallèle avec le plan du texte traditionnel, sans lequel il fut longtemps inconcevable d'écrire la moindre ligne), elles-mêmes subordonnées à l'analyse et la spécification des problèmes à modéliser (cette étape étant à rapprocher du positionnement stratégique des textes littéraires, visant à préciser l'effet qu'on en attend sur les lecteurs).

Par la suite, comme pour le développement des outils de 'traitement de textes', des environnements techniques de programmations sont apparus qui ont permis au programmeur de s'affranchir de la tyrannie

du ‘cycle en V¹’, et des paradoxes engendrés par sa stricte observance. La programmation devient vite une activité concurrente, davantage incrémentale et créative.

De la même manière que l'usage des logiciels de ‘traitements de textes’ a transformé l'acte d'écriture en abolissant incidemment la rupture méthodologique fond-forme, ou encore que l'usage des outils de présentation d'information multimédia a généralisé la notion d'arrière-plan graphique issue du théâtre et de l'opéra, la programmation par objets a ouvert une transformation en profondeur de l'activité de programmation elle-même, en facilitant l'usage de prototypes et de maquettes pour préciser progressivement la spécification des besoins et l'adéquation des solutions.

La notion d'ontologie en acquisition des connaissances

La nécessité de concevoir des *Systemes experts* a rapidement conduit les informaticiens à s'interroger sur la notion de connaissance.

En effet, les *Systemes experts* furent conçus comme des *Systemes* à bases de connaissances exploitées par des moteurs d'inférences, sur la base de résultats de Logique mobilisant le Principe de déduction (*Modus ponens*) et généralisant aux connaissances la traditionnelle séparation des données du traitement, préconisée en programmation.

Pour extraire la connaissance des experts, les ingénieurs cogniticiens œuvraient en amont de la conception des systèmes à l'aide de techniques d'interview ou de questionnaires, jusqu'à ce qu'ils s'aperçoivent que cette prétendue extraction des connaissances consiste en fait en un véritable processus constructif de modélisation.

¹ Le cycle en V proposait les séquences suivantes, irréversibles en droit :

- analyse et spécification des besoins -> conception globale
- conception globale -> conception détaillée
- conception détaillée -> réalisation
- réalisation -> tests unitaires
- tests unitaires -> tests d'intégration
- tests d'intégration -> validation de la satisfaction des besoins.

Très vite, on a repris une hypothèse que Newell proposait dès 1982 sous le nom *d'Hypothèse du niveau des connaissances*, pour l'étendre à une véritable définition générale de la connaissance vue par les informaticiens. La connaissance devint ce dont a besoin un agent rationnel (humain ou artificiel) pour réaliser le Principe de rationalité suivant : dis-moi ce que veux, ce que peux, ce que sait, je te dirai ce que fais.

Autrement dit, la connaissance est devenu le lien essentiel entre les programmes et leur manifestation dans le monde, la connaissance faisant lien dualiste entre d'une part le code informatique interprété par les machines, et d'autre part l'agent artificiel émergent susceptible d'être engagé dans un processus de résolution collective de problèmes, mêlant des agents artificiels à des agents humains.

Les interactions personne-ordinateur

Certes, l'investissement d'esprit d'un agent artificiel réalisé par un programme d'ordinateur peut prendre la forme d'un dialogue fruste, éludé et implicite comme celui qui caractérisait les premiers programmes de calcul.

Le prompt des programmes constitue à la fois un défi à la vérification du résultat annoncé précédemment et une invitation à une nouvelle provocation. La métaphore de dialogue est ici celle de l'oracle mystérieusement omniscient et omniprésent, pourvu que les formes rituelles de la consultation soient scrupuleusement respectées. La puissance de cette métaphore ancestrale est telle qu'elle noue implicitement l'attention, l'intention et la confiance de l'utilisateur consultant.

Il faudrait encore remarquer qu'un dieu incarné est caché derrière l'oracle, qui l'instruit et prescrit son comportement à travers un double langage, lui aussi allégorie d'un dialogue. Pris entre deux discours humains, l'oracle finit par faire figure humaine, d'autant que l'interlocuteur de l'oracle est frère du dieu incarné.

Mais parfois, c'est l'interactivité d'un programme qui lui confère l'investissement d'esprit. C'est ainsi que la technologie du traitement de texte informatisé a révolutionné l'écriture.

A mon estime, la révolution ne tient pas essentiellement à l'aide à l'écriture traditionnelle que constitue également un tel outil, dans la mesure où il décharge le rédacteur de tâches répétitives et fastidieuses, l'assiste dans des tâches délicates comme le contrôle et la correction de l'orthographe, ou encore lui offre d'important services de normalisation.

Si révolution il y a, elle tient plutôt à la réconciliation actualisée entre la lecture et l'écriture : avec un traitement de texte, quelque chose de l'intimité originelle entre lire et écrire est retrouvé, qui rend caduque une partie des règles traditionnelles de l'élaboration d'un texte, exigeant que la forme soit d'une certaine façon conçue avant le fond.

Ecrire, c'est toujours écrire ce qui reste à écrire, c'est-à-dire le manque à lire. Ecrire, c'est lire ce qu'on a écrit et écrire ce qu'il faudrait lire encore pour avancer en compréhension. Lire, c'est écrire en creux ce qu'il aurait fallu écrire pour qu'on lise mieux. Les deux activités sont indissociables, et seuls des raisons liées aux contraintes induites par un dispositif technique daté les ont artificiellement dissociées.

L'informatique multimédia

Alors que l'intelligence artificielle opère essentiellement dans le champ de la langue, le multimédia voudrait opérer dans celui de la perception.

L'informatique multimédia vise à simuler le scintillement de la gangue du monde face aux intentions personnelles qui détournent, entourent, forcent le parcours et le contour de ce que nous appelons la réalité sensible, que nous conformons, filtrons, agrégeons, corrélons et fusionnons sans relâche. Il existe un proverbe espagnol qui exprime que "lorsqu'on a un marteau en main, tout ressemble à un clou". Cela signifie que les choses saillent à la hauteur des prégnances qu'exercent sur elles nos intentions : si je circule dans la rue avec la faim au ventre, les vitrines des traiteurs et des boulangers seront beaucoup plus saillantes que les vitrines des cordonniers.

Mais comment communiquer l'impression perceptuelle que porte un mot comme 'véhicule' sans réduire ce concept à une de ses représentations prototypales ? Au 'tout langage' conceptuel de

l'intelligence artificielle (manipulation de symboles interprétables en langue, programmation en langage, interfaces de contrôle d'inspiration langagière), le multimédia peut-il opposer une sorte de 'tout gestuel' perceptuel et corporel ?

Pour beaucoup, la réponse est d'abord technologique, et y répondre consiste à disposer d'interfaces de contrôle de la perception (un peu à la manière des appareils de type reflex dans le domaine de la photographie) et à se doter de moyens de modélisation et de rationalisation d'objets perceptuels permettant de les manipuler.

Le multimédia est actuellement vendu en prêt-à-monter au grand public comme aux grands utilisateurs, et les résonateurs de marchés prévoient l'avènement rapide d'environnements informatisés qui permettront de réaliser facilement de nombreuses applications interactives novatrices.

Tout porte à croire en effet que l'approche informatique, basée sur la théorie de l'information et une vue analytique de la raison, triomphera cette fois encore des difficultés pourtant considérables levées par l'ambition de doter les ordinateurs de capacités d'interaction plus sensorielles.

Pour s'en convaincre, il suffirait de faire l'état des lieux de la technologie : les indispensables moyens de restitution des sons et des images sont en place dans les ordinateurs, les normes et les standards d'échange de données numériques se structurent à grands pas, et les périphériques d'acquisition sont désormais disponibles sur le marché. Quelques applications significatives ont d'ores et déjà été réalisées et certaines, souvent très spécifiques, ouvrent incontestablement à de nouveaux usages.

Mais dans la pratique, les applications multimédia réussies sont constituées d'astucieuses associations de données, de programmes de manipulation et d'interfaces, qui confèrent à un système artificiel une aptitude circonstancielle à être, non pas investi d'esprit ni même de corporéité, mais plutôt de contextualité .

L'informatique multimédia vise des outils qui permettraient de replier dynamiquement l'intention d'action sur la perception. Cette discipline précise ainsi la notion de simulation, dans un sens fort. Son enjeu

semble bien être la réconciliation entre la perception et l'action, deux catégories séparées par la philosophie des Lumières.

C'est ainsi à une véritable déconstruction d'un divorce que nous invite l'informatique multimédia, si tant est qu'on accepte d'élargir sa définition à la mesure qu'elle exige. Cela augure de belles heures de recherches pluridisciplinaires. En particulier, les sciences cognitives d'inspiration analytique pourraient bien y perdre progressivement l'hégémonie qu'elle manifestent actuellement dans ces domaines.

5. Etude de cas : renseignement et image satellitale

Cette section propose quelques pistes de réflexion sur l'imagerie satellitale et son usage dans le domaine du renseignement.

Examinons tout d'abord la raison qui fait que l'avènement des ordinateurs change radicalement notre manière d'envisager l'interprétation des images satellitales.

Cette raison provient de la conjugaison de trois phénomènes qui sont tous les trois intimement liés aux possibilités ouvertes par les machines à manipuler les symboles que sont les ordinateurs.

Le premier phénomène concerne le calcul topologique, qui permet d'imposer une norme de distance à un espace et à disposer rapidement de fonctions de calcul élémentaires ou sophistiquées sur cet espace. C'est ainsi qu'on peut affecter à une image satellitale l'espace occupé sur la Terre par la zone imagée et calculer aisément, par de simples désignations "à la souris" et grâce à des métaphores graphiques appropriées, les coordonnées réelles de points caractéristiques représentés, mais aussi des distances et des surfaces.

Pourvu qu'on dispose également de références d'altitude, ces fonctions ouvrent la porte à des simulations utiles et néanmoins assez faciles à réaliser comme la détermination d'une ligne de partage des eaux ou encore la surface immergée d'une région au Nord d'un parallèle.

Dans ce registre, les limites sont à chercher dans la qualité des données de référence (ceci est un peu compliqué par la non-rotundité

de la Terre) et dans la rigueur de conception de l'ergonomie des outils qui instrumenteront les manipulations symboliques.

Le deuxième phénomène concerne le dessin vectoriel, qui permet de représenter graphiquement des figures de toutes sortes (ponctuelles, linéaires, surfaciques ou volumiques), aptes à symboliser avec pertinence des objets ou des concepts du monde réel, pourvu qu'on ait été assez rigoureux pour établir à l'avance des normes de représentation qui prescrivent le plus adroitement possible l'interprétation et l'usage de ces symboles.

Rien n'interdira alors de géoréférencer ces objets lors de leur création, et par exemple de les afficher en surimpression d'une image satellitale pour constituer diverses couches thématiques qui contraindront l'interprétation de la photographie. Rien n'interdira non plus d'instituer une gestion de la création de ces symboles (par exemple, on contrôlera automatiquement qu'un symbole représentant un avion ne se trouve pas situé sur un terrain marécageux, ou tout au moins on préviendra l'interprète du caractère peu plausible de son interprétation) ou de leur affichage (pour éviter l'impression de confusion qui résulterait de l'affichage de trop nombreux symboles, on organise la symbolique en couches thématiques qu'on regroupe par commodité).

Les limites de ce genre de pratique sont d'ordre ergonomique, et soulèvent de très intéressantes questions dont la plupart correspondent à des problèmes de recherche ouverts : par exemple, des difficultés surgissent lorsqu'on désire coupler des actes de navigation topologique à un comportement pertinent des symboles associés à une image. Ce couplage est pourtant nécessaire : sans cela, zoomer sur une image qui représente un régiment aux normes OTAN (un rectangle supportant une icône reconnaissable) risquerait fort de conduire à une image limitée à un énorme rectangle ! Et puis, sommes-nous certains qu'à partir d'une certaine échelle, le régiment soit encore la notion opérationnelle la plus pertinente à représenter ? Ces remarques ouvrent le délicat dossier de la sémantique des symboles graphiques, et plus généralement celui de la simulation et de la réalité virtuelle.

Le troisième phénomène s'apparente à la représentation des connaissances par des objets symboliques, organisés selon des modes inspirés de la philosophie grecque et qui permettent en théorie la description économique et rigoureuse d'un univers conceptuel complexe.

Le mode privilégié d'organisation de ces connaissances ressemble un peu aux taxinomies élaborées à grand peine par les botanistes du siècle dernier, visant à synthétiser un domaine entier de connaissance en établissant des héritages fondamentaux entre concepts.

L'informatisation de ces procédés, qui n'est pas sans poser de très difficiles problèmes lors de l'acquisition et la maintenance de ces connaissances, est à la base d'une révolution dans la manière de concevoir l'exploitation interactive de vastes gisements de connaissances préalablement formalisés.

C'est ainsi qu'un régiment de chars particulier sera caractérisé par certains paramètres spécifiques, tout en héritant d'un certain nombre de propriétés génériques à tout régiment de chars, voire à tout régiment.

La conjugaison des trois phénomènes précédents ouvre véritablement un monde nouveau pour l'interprétation d'images satellites assistée par ordinateur, que certains appellent déjà le monde de la raison computationnelle, signifiant par là que ces possibilités autorisent un mode de pensée aussi radicalement nouveau que l'était en son temps l'avènement de la raison graphique, manifesté par l'apparition de l'écriture.

Cette considération n'est peut-être pas excessive. Comment, en effet, penser une requête aussi puissante que celle-ci signifiée par un simple geste de désignation "à la souris" : "Quel est le rapport de force prévisionnel dans telle zone de la photographie ?" ?

Dans cet exemple, l'ordinateur "sait" extraire les objets symboliques contenus dans la zone désignée par simple encerclement, puis enquêter sur la nature de ces objets en termes de puissance de feu et d'appartenance à telle ou telle armée, et enfin présenter un synoptique détaillé du rapport de force, en tenant éventuellement compte de

modèles de déplacement des mobiles en fonction du terrain. Et cela, aucun décideur ne peut le faire sans un tel outil.

On a le sentiment que l'ordinateur permet dans une certaine mesure de compenser la puissance d'interprétation qu'on a perdue lorsqu'on s'est résigné à confondre la photographie avec ce qu'elle représente. Il convient de préciser ce sentiment et d'examiner les fondements de sa constitution, ce qui passe par une méditation sur la perception.

Percevoir est un acte à part entière. Cela signifie que la perception manifeste un projet intentionnel autant qu'elle le détermine. En d'autres termes, perception et engagement sont inséparables.

C'est ainsi que les yeux exorbités du célèbre loup de Tex Avery nous en apprennent long sur le regard. Regarder est une activité à part entière, qui certes mobilise l'œil et le corps, mais aussi signifie et détermine un projet. Le regard est à lui seul enquête et procès. S'il n'y a pas de regard figé, c'est parce que le regard est par nature action, qui se déploie dans l'exacte mesure de l'interprétation qu'il produit et motive dans un même mouvement.

Essayez donc de regarder gratuitement, et constatez comme cette gratuité artificielle commute aussitôt en une déflagration de l'attention qui scintille, détoure, entoure, contourne, parcourt, faisant jaillir l'intérêt et le projet, soupeser les possibles, réformer les hypothèses et conformer les envies. L'œil alors focalise, cadre, filtre, scrute et déjà agrège, corrèle, fusionne, renonce, dénonce.

Le plus souvent, l'acte de regarder est étroitement coordonné à d'autres actes de perception et à des gestes opérants sur le monde. Mais il arrive qu'il en soit autrement : la contemplation par exemple consiste à focaliser à l'infini sur un vaste horizon, sans intention prédéterminée. On peut penser à Lamartine dans ses méditations poétiques, et tout particulièrement à l'admirable 'Isolement'.

Une photographie est la trace d'un regard intentionnel, retranchée derrière un objet permanent. Mais la permanence de l'objet ne fige nullement la perception qu'on peut en avoir : regarder une photographie est un acte d'interprétation qui, bien que contraint par la nature de l'objet, a toujours pour visée la constitution compulsive du

sens. Ce qui fascine dans une photographie, c'est précisément la révélation que le sens de l'objet permanent n'est pas permanent, et qu'il se donne sans cesse de façon nouvelle. L'énigme de l'intention du photographe est pour beaucoup dans cette fascination.

L'impression de puissance se fait plus forte lorsque l'usage de prothèses optiques permet au photographe de donner à voir sans prothèse des photographies qui représentent des scènes ordinairement inaccessibles. C'est ainsi que les images satellitaires constituent un défi étonnant à la perception visuelle : elles donnent à voir une globalité géographique, prise 'du dessus', depuis un lieu pour le moins inhabituel à l'homme, sans qu'un geste humain prédestine l'objet dans son contenu visuel.

Nous avons pris conscience que le regard mêle l'acte cognitif au geste physique du corps et de l'œil. Si la photographie prescrit largement le geste physique du corps et de l'œil, elle stimule en revanche l'élucidation cognitive de son sens. Mais avec la photographie, le regard bute sur la représentation (la focale est fixée, le cadre réduit, la lumière inactive, le mouvement est définitivement fixé dans le flou qui l'évoque). La photo prescrit largement les modalités physiques du regard : l'activité d'interprétation est courbée, il y a suspension du geste physique et exacerbation de l'acte cognitif.

La photographie tout à la fois fascine le regard et le frustre, et ceci est tout particulièrement vrai de l'image satellitaire, qui flatte la puissance par son caractère de domination (quand elle n'incite pas à la contemplation), mais prive le regard de son expression investigatrice, d'autant plus que l'image vient de nulle part et ne résulte de nulle intuition de photographe.

Les photo-interprètes, tant les experts du début de la chaîne de traitement que les décideurs exploitants, n'auront de cesse d'imaginer des artifices permettant de désintellectualiser l'image et de lui redonner sa plasticité. L'idéal mythique serait en fait de revenir à l'état originaire qui précède l'objectivation de la perception dans l'image !

Pour compenser l'activité musculaire réflexe de l'œil et du corps engagée dans le regard, l'idée est de doter l'image d'une plasticité artificielle, qui simulerait en quelque sorte cette activité réflexe ou la

remplacerait par une activité réfléchie correspondante. A l'heure du discours scientifique magnifié, pourquoi ne pas investir l'image de moyens de répondre aux questions qu'aiment poser les scientifiques ?

Il s'agit pour cela de replier sans cesse l'interprétation de l'image sur elle-même, pour en quelque sorte densifier son aptitude à prendre en charge la raison raisonnante, et seul l'ordinateur comme technique autorise une telle pratique. Mais cette affirmation mérite une explication. Et d'abord, précisons ce que nous entendons par "interprétation d'images repliée sur elle-même".

A priori, l'interprétation d'une image pourrait se traduire par un ensemble de commentaires textuels, certains textes pointant à la manière de légendes sur tel ou tel détail de la photographie, un peu comme le font les radiologues préparant un dossier médical à la demande d'un chirurgien s'interrogeant sur les modalités d'une intervention.

Le dossier pourrait certes être enrichi de schémas, de dessins, d'icônes, de plans, de flèches de désignation, de traces surlignées, et le texte pourrait tendre vers un hypertexte, un peu comme dans l'édition moderne (un hypertexte est un texte structuré de façon à ouvrir les modalités de sa lecture, afin de permettre à chaque lecteur de parcourir le document par des chemins de traverse, grâce à des pointeurs aussi variés que des notes, des index, une table des matières, une bibliographie ou des résumés).

Rien ne justifie a priori qu'on rabatte (qu'on replie) le commentaire de l'image sur l'image elle-même, en cherchant à l'augmenter d'une symbolique qui prescrive son interprétation à venir. Cette pratique, au fond, n'a de sens que parce qu'elle ouvre à l'exploitation informatique d'une image surdéterminée, à la manière présentée ci-dessus.

Cette attitude de surcharge interprétative de l'image, qui engendre des images "augmentées" au sens de la réalité augmentée, n'est pas sans conséquence sur le sens de l'acte d'interprétation. Car incontestablement l'image, et tout particulièrement l'image satellite, jouit d'un privilège de réalisme, privilège particulièrement goûté à notre époque. Il se trouve que ce privilège, qui ferait de l'image une

donnée plus concrète, plus conforme à la réalité que tout autre, est largement usurpé.

L'interprétation de telles images est une activité qui n'a de sens que dans un contexte très particulier : c'est l'interprétation du territoire et de son aménagement humain comme signe de transformations ou d'activités permettant des estimations ou des prévisions. Mais rien ne distingue l'image satellite d'un camp de réfugiés mourant de soif d'un camp de réfugiés établis dans des conditions sanitaires supportables.

C'est là le "scandale" de ce type de photographie, mais c'est peut-être là aussi une des raisons de la fascination qu'elle exerce. L'image satellitale laisse croire à la possibilité d'une gestion du monde par-dessus, sans s'en approcher et sans s'y commettre, en ne reconnaissant de l'Homme que le corrélat (la trace dans le monde) de son industrielle activité.

Ce qu'on perd avec la photographie, ce n'est pas l'éprouvé, mais l'éprouvé "qui peut quelque chose", l'éprouvé vécu dans l'immédiateté et dans l'ouverture à l'émotion, c'est-à-dire à l'action l'immédiate. Avec la photographie, l'émotion est suspendue de sa destination et se prend pour objet, dans un repli réflexif.

La raison computationnelle permet de regagner en rationalité ce qu'on a perdu en émotion. L'un permet-il de compenser l'autre ? La question est sans doute mal posée, et il convient peut-être mieux d'ouvrir des champs exploratoires et de se demander où va nicher l'éprouvé ainsi déniché par une nouvelle raison.

Il en va d'une conviction philosophique, qui pose l'irréductibilité de la conscience immédiate, et la destinée ultimement subjective de la raison. Une raison n'est telle que pour convoquer l'émotion.

Selon cette conception, il en va de l'acte de parler en langue comme de tout autre acte d'expression : il auto-affecte. Parler médiatise un vécu éprouvé dans l'immédiateté et le déplace dans le même mouvement. Attester une subjectivité ne peut se faire que dans un renoncement à sa clôture actuelle. Seule la tirade de l'autre ouvre au déploiement d'un sens dialogique, par dépassement : la subjectivité serait ainsi un corrélat de l'intersubjectivité.

Husserl remarquait déjà dans son "idées directrices pour une phénoménologie" que la question du corps propre se noue de façon similaire : la main droite qui touche le bras gauche est présente (touchante) dans l'exacte mesure où le bras est présent (touché). Et lorsqu'une main touche le bras d'un autre corps, elle n'apprécie le corps d'un autre que dans l'échange kinesthésique même qui fait advenir le corps propre.

Et Merleau-Ponty considère la perception visuelle comme un empiètement mutuel du regardant et du regardé, en accord avec Paul Valéry qui écrit à propos de "regards qui s'échangent" : 'Cet échange réalise une transposition, un chiasma de deux destinées, de deux points de vue. Il se fait par là une sorte de réciproque limitation spontanée. Tu prends mon image, mon apparence, je prends la tienne. Tu n'est pas moi, puisque tu me vois et que je ne me vois pas. Ce qui me manque c'est ce moi que tu vois. Et à toi, ce qui manque, c'est toi que je vois'.

Le coude-à-coude (pied-à-pied, dos-à-dos, nez-à-nez ou bouche-à-bouche) ne serait pas radicalement différent du tête-à-tête et du bouche-à-oreille.

Conclusion

Vivre, c'est toujours éprouver dans l'immédiateté. Le vécu éprouvé est toujours singulier et définitivement personnel. Même l'acte d'exprimer est un acte vécu dans l'immédiateté, bien qu'il ait la médiatisation comme visée et comme corrélat une expression qui ajoute au monde.

Ainsi, l'acte d'expression ne saurait se réduire à l'exprimé, pas plus d'ailleurs que l'impression ne se réduit à l'imprimé. Le sens est par nature interprétatif, c'est-à-dire qu'il engage toujours un interprète.

Une remarque encore à ce sujet. Dire que 'le sens n'est pas immanent au substrat auquel on allouera pourtant ce sens' est plus radical que ce que disent la plupart des informaticiens lorsqu'ils concèdent l'impossibilité d'allouer valablement du sens au local et qu'ils militent pour une allocation systémique du sens en faisant dialoguer le local et le global. La position contextualiste serait donc une persévérance perverse dans une voie épistémologiquement contestable.

Quelles sont les conséquences de cette position dans le domaine de l'artéfacture d'outils destinés à opérer dans le champ du sens ? Tout d'abord, si le sens d'un exprimé n'est pas immanent à l'exprimé, il ne saurait y avoir d'outil automatique de révélation ou d'extraction du sens. Reste qu'on peut imaginer, en droit, des outils d'aide à la détermination provisoire d'un sens ou d'assistance à l'assignation contingente de sens, même lorsque l'expression n'est pas strictement codée pour prescrire son interprétation de manière biunivoque.

Et si Diderot s'était trompé en opposant la dyade jugement-pénétration à la dyade sensibilité-enthousiasme dans sa théorie de la simulation ? Quelles en seraient les conséquences sur les conditions de possibilité d'une simulation informatique ?

Références bibliographiques

Sources philosophiques et littéraires

Denis Diderot, *Paradoxe sur le comédien*, Larousse, 1934

Eugen Fink, *Le jeu comme symbole du monde*, Les éditions de minuit, 1966

Witold Gombrowicz, *Ferdydurke*, Gallimard, 1966

Hans Jonas, *Le phénomène de la vie*, De Boeck Université, 2001

Martin Heidegger. 'Le principe de raison', *Tel Gallimard*, n° 79, 1962.

Constantin Stanislavski, *Ma vie dans l'art*, L'Age d'Homme, 1980

Paul Valéry, *Tel Quel*, Gallimard, page 37, 1986

Bibliographie informatique et sciences

Bruno Bachimont, *Des machines qui pensent aux machines qui donnent à penser*, thèse de doctorat, 1998.

Alain Cardon, *L'informatique, science ou technologie ? Un formidable défi pour l'intelligence artificielle* °, Bulletin de l'AFIA, n° 42, juillet 2000

Hubert Dreyfus, *Intelligence artificielle - mythes et limites*, Flammarion, 1984

Paul Jorion, *Le mathématicien et sa magie : Théorème de Gödel et anthropologie des savoirs*, Cahiers STP Maison des Sciences de l'Homme, à paraître, décembre 2000

Anne Nicolle, *Science et technique, l'évolution des rôles*, actes des Journées de Rochebrune, à paraître, 2001

Jean-François Perrot, *Des objets aux connaissances*, Journée Méthodes objets et Intelligence Artificielle : Frontières, Ponts et Synergies, Paris RIA, juin 1994

François Rastier, *Représentation ou interprétation, perspective herméneutique sur la médiation sémiotique*, Presses universitaires de Grenoble, 1996

Jean-Michel Salanskis, *Le temps du sens*, Editions HYX, 1997

Pierre Saurel, *Nécessité des modèles en sciences cognitives : de la modélisation à la mise en parangon*, thèse de doctorat en épistémologie, janvier 1998

Didier Vaudène, *Une contribution à l'étude des fondements de l'informatique*, thèse de doctorat d'Etat, octobre 1992

Joseph Weizenbaum, *Raisonnement de l'homme, intelligence de la machine*, Edition de l'informatique, 1975

Terry Winograd et Fernando Flores, *L'Intelligence artificielle en question*, PUF, 1989

L'anticipation dans les systèmes complexes. Conséquences pour la simulation

Serge Stinckwich

Serge.Stinckwich@info.unicaen.fr

GREYC, Équipe MAD, Université de Caen

Mots clés : anticipation, simulation, modélisation, modèle interne, relation de modélisation de Rosen.

1 Introduction

L'approche réductionniste, généralement employée en science, est la croyance qu'un système peut être décrit en terme des propriétés internes de ses composants. La théorie des systèmes quant à elle, dit que les systèmes complexes tels que ceux de nature biologique ne peuvent pas être étudiés de cette façon, car ce sont des systèmes ouverts qui interagissent avec leurs environnements et qu'alors, une vue d'ensemble (i.e. holiste) doit être adoptée.

Dans la plupart des sciences, notamment lorsqu'elles touchent l'étude de systèmes complexes, les ordinateurs jouent un rôle prépondérant comme équipement d'exploration et d'explication. Dans le cadre des simulations informatiques, les programmes utilisés peuvent être alors considérés comme des sortes d'expériences scientifiques réalisées dans du logiciel.

Néanmoins, ni les machines, ni les mathématiques ne peuvent expliquer le comportement holistique de tous les systèmes. Les **systèmes anticipatoires** sont par exemple une forme de système qui ne peut pas être étudié complètement par les ordinateurs car se sont comme nous le verrons des systèmes linguistiques.

La simulation permet de modéliser, de prédire le comportement des systèmes complexes, mais son approche fondamentalement réductionniste en limite le champ d'applications. Y-a-t-il d'autres outils théoriques réalisant des objectifs similaires par des moyens différents ? On va s'intéresser ici à l'anticipation, comme nouvel outil transdisciplinaire d'étude des systèmes complexes à la fois complémentaire par rapport à la simulation, mais également assez proche dans ses objectifs de modélisation.

Notre propos dans cette communication est double : d'une part montrer que les systèmes sont la plupart du temps des systèmes anticipatoires et que par voie de conséquence la simulation doit prendre cela en compte, et d'autre part montrer que l'anticipation est un nouvel outil d'étude de ces systèmes complexes.

Notre réflexion sur l'anticipation dans les systèmes complexes est inspirée par les travaux novateurs de Robert Rosen, théoricien de la biologie. Cet auteur définit l'anticipation comme une caractéristique fondamentale des systèmes biologiques. Il considère l'anticipation comme étant une sorte de simulation d'évènements réels, bien que se déroulant sur une échelle de temps différente.

L'anticipation est une partie importante des systèmes autonomes tels que les systèmes vivants et plus généralement les systèmes organisationnels. Ces systèmes doivent interagir en permanence avec l'environnement dans lequel ils se trouvent afin d'acquérir les ressources nécessaires à leur survie face aux dangers et à la dissipation continue d'énergie. La capacité à anticiper conditionne l'aptitude de chaque espèce à la survie.

Malgré son côté relativement fondamental, l'anticipation est une caractéristique des systèmes qui a été peu étudiée jusqu'à présent. Un frein à l'adoption de l'idée d'anticipation est peut-être à rechercher dans le fait qu'elle rentre en conflit avec les notions bien connues de cause et d'effet.

Alors que le programme de la simulation se positionne plutôt dans le cadre de la science classique newtonienne, les fondements de l'anticipation selon Rosen reposent plus sur le principe de **causes finales** défini à l'origine

par Aristote. L'anticipation peut donc être considérée comme un retour en arrière dans la compréhension du monde qui nous entoure, car la notion de cause finale a été abandonnée comme principe d'explication dans les sciences.

Traditionnellement, la science s'occupe des questions du type "comment?". Cela correspond à une vision plutôt mécaniste qui voit les phénomènes comme des machines dont il faut comprendre la nature. Les questions de type "pourquoi?" sont au mieux traitées dans le cadre de la métaphysique. Aristote le premier s'est intéressé au "pourquoi" en distinguant quatre causes : la cause matérielle, la cause efficiente, la cause finale et la cause formelle. Prenons pour exemple une statue, on obtient alors les quatre causes :

- la cause matérielle est le marbre,
- la cause efficiente est le sculpteur,
- la cause formelle est la configuration de la statue,
- la cause finale est ce en vue de quoi est faite la statue (sa destination).

Généralement, la science s'occupe des trois premières causes, mais pas de la dernière. Dans ce cadre, la simulation s'intéresse plutôt au "comment" et l'anticipation au "pourquoi".

L'anticipation offre la possibilité d'expliquer le comportement d'un système à partir de ses intentions. Il s'avère en effet plus simple de comprendre le fonctionnement d'un système à partir de son comportement futur (i.e de ses buts).

2 L'anticipation dans les systèmes complexes

La notion d'anticipation peut donner lieu à quantité d'interprétations différentes. Afin de motiver son étude et de sa nécessaire prise en compte lors

de l'activité de simulation, nous allons d'abord montrer quelques évidences de celle-ci d'un point de vue psychologique et biologique, puis retracer les premières tentatives scientifiques de fonder le concept par Rosen (Rosen R., 1985), Nadin (Nadin M., 1999) et Dubois (Dubois Daniel M., 1999). Ils ont montré que la tâche est ardue, car on s'attaque alors à la vue dominante du monde, inspirée par un modèle déterministe fondé sur la physique dans lequel il y a une distinction claire entre cause et effet.

2.1 Évidences psychologiques et biologiques

Depuis le début du 20^{ème} siècle, plusieurs travaux de psychologues notamment, ont tenté de montrer que la prédiction d'évènements futurs et de leurs conséquences, appelée également "anticipation" joue un rôle fondamental dans la coordination et la réalisation des comportements adaptatifs des êtres vivants, ainsi que dans les mécanismes de mémoire et d'attention.

Le rôle de l'anticipation dans la psychologie animale fut pour la première fois conceptualisé par le psychologue Edward Tolmann en 1932 (Tolman Edward C., 1932) qui pensait que le stimuli-réponse behavioriste classique alors à la mode était trop limité pour expliquer certains comportements animaux. Il introduit donc la notion de *SRE*-units (Situation-Reaction-Effect) qui représente la connaissance d'un organisme que dans la situation *S*, la réaction *R* produira la conséquence *E*.

Seward en 1949 (Seward J.P., 1949) mis en évidence un phénomène d'apprentissage latent¹ en examinant le comportement de rats explorant des labyrinthes qu'il expliqua par l'existence d'un modèle interne de l'environnement pour les rats. Cet apprentissage latent fut formalisé en 1992, par Hoffman (Hoffmann Joachim, 1993) en psychologie cognitive par *la théorie du contrôle du comportement par l'anticipation*.

Pour les humains, Hoffmann a montré comment l'anticipation peut être ap-

¹ L'*apprentissage latent* est l'apprentissage sans récompense ou punition à la différence de l'apprentissage par renforcement.

prise et contrôler le comportement, ce qu'il formula de la manière suivante : "un comportement intentionnel (R) est toujours accompagné de l'anticipation des effets (E_{ant}) escomptés par rapport à une expérience précédente dans la situation (S). L'anticipation des effets (E_{ant}) est toujours comparée à l'effet réel (E_{real}). Les anticipations correctes doivent provoquer le renforcement de la relation entre la situation (S) et les effets anticipés (E_{ant}) alors que les anticipations incorrectes doivent provoquer au contraire une différenciation des conditions liées à la situation."

L'anticipation apparaît également en psychologie cognitive dans la théorie de la construction personnelle (PCP) de Georges Kelly (1905-1967). Kelly s'intéressa également à la simulation de personnalité. Le postulat fondamental de Kelly concernant sa théorie est : "A person's processes are psychologically channelized by the way in which he anticipates events." (Kelly G.A., 1955). Il voit les personnes comme des "scientifiques personnels" qui anticipent le monde. Un des corollaires qu'il tire de ce postulat élémentaire énonce que : "A person anticipates events by construing their replications.", ce qui correspond à la définition que Rosen donne de l'anticipation que nous verrons un peu plus loin.

Enfin en neuro-psychologie, (Heinze A. et al., 1999) ont mis en évidence une certaine forme d'anticipation sensori-motrice dans le cortex, qu'ils ont ensuite implémentée par un réseau neuronal.

L'ensemble de ces observations tend à montrer que si on veut construire des simulations sur machines de comportements animaux, l'incorporation des mécanismes d'anticipation est indispensable.

2.2 Modèles des systèmes anticipatoires

Windeknecht (Windeknecht T.G., 1967) fut le premier à classer les systèmes en deux ensembles complémentaires : causaux et anticipatoires. Robert Rosen (1934-1998) connu pour ses travaux en biologie théorique et en épistémologie, a proposé en 1985 (Rosen R., 1985) un modèle de l'anticipation, qu'il résume par la définition suivante : " a system containing

a predictive model of itself and/or of its environment, which allows it to change state at an instant in accord with the model's prediction to a later instant." Un tel système utilise donc la connaissance qu'il a des états futurs pour prendre des décisions dans l'état présent. Cette définition s'oppose à la vision causale du monde généralement admise depuis Descartes et Newton (i.e l'état d'un système dépend de son état initial). Néanmoins si l'état d'un système dépend uniquement de son état initial, l'intention d'un système est alors niée, ce qui d'après Castelfranchi (Castelfranchi Cristiano, 1994) implique qu'un tel système n'est pas un agent autonome². On peut donc dire que s'intéresser au domaine des systèmes multi-agents c'est forcément s'intéresser à l'anticipation.

Pour Rosen, si S_1 et S_2 sont deux systèmes naturels, alors S_2 est anticipatoire (relativement à S_1) si S_2 possède un modèle prédictif de S_1 ³. C'est ce que Rosen appelle également la **relation de modélisation**.

Dans les systèmes causaux, le passé est la cause du présent et il n'y a pas de référence au futur comme agent déterminant, contrairement aux systèmes anticipatoires où les attentes sont la cause de l'action présente. Pour notre cas, nous établissons clairement une distinction entre anticiper et prédire : les deux consistent bien à voir dans le futur, mais alors que prédire est une activité passive, anticiper a un côté actif où on tente d'éviter l'état non désiré. L'anticipation est souvent un acte intentionnel, Ekdahl parle même d'anticipation consciente. La prédiction doit plutôt être vue comme une première étape de l'anticipation. Nous appellerons exo-anticipation, l'anticipation de l'environnement par un observateur anticipateur (i.e prédiction), et ando-anticipation, l'anticipation qui prend en compte les actions de l'observateur.

Les travaux d'Ekdahl (Ekdahl Bertil, 1997), (Ekdahl Bertil, 1999), (Ekdahl Bertil, 2000), ainsi que ceux de Dubois ont contribué à établir plus for-

² On notera également que l'anticipation fait partie également des éléments requis pour construire un mécanisme de libre-arbitre par Bruce Edmonds (Edmonds Bruce, 2000).

³ Rosen ne veut pas dire modèle dans le sens logique ou mathématique, mais il l'utilise comme synonyme de système formel ou théorie

mellement la notion d'anticipation en critiquant certaines positions prises par Rosen.

Ekdahl par exemple est plus précis que Rosen dans sa formulation de l'anticipation et établit une différence entre **l'anticipation basée sur une description** et une **anticipation basée sur un modèle**. La première classe correspond par exemple à tous les insectes qui ne sont pas capables d'observer et de raisonner sur leur propre phénotype⁴, l'autre classe correspond aux entités douées de planification, et qui non seulement peuvent raisonner dessus mais également sont conscientes de ceci. Pour les membres de cette classe, le raisonnement s'établit forcément au moyen d'un métalangage. Seuls les systèmes basés sur une description peuvent être simulés par un ordinateur et être étudiés analytiquement.

De manière formelle, l'état x_{k+1} d'un système causal discret dépend de ses états antérieurs et d'autres paramètres du système (a) :

$$x_{k+1} = f(\dots, x_{k-2}, x_{k-1}, x_k; a)$$

alors qu'un système anticipatoire tel qu'il a été défini par Rosen dépend également des états x_i suivant l'état courant x_k :

$$x_{k+1} = f(\dots, x_{k-2}, x_{k-1}, x_k, x_{k+1}, x_{k+2}, \dots; a)$$

Un tel système anticipatoire est appelé **système anticipatoire fort**. On a bien donc un système auto-référentiel dans la causalité. Si il y a plusieurs x_k possible, le système est dit hyper-incursif, sinon il est seulement incurusif. Généralement un système anticipatoire fort n'est pas réalisable et on considère une approximation de celui-ci :

$$x_{k+1} = f(\dots, x_{k-2}, x_{k-1}, x_k, \hat{x}_{k+1}, \hat{x}_{k+2}, \dots; a)$$

où \hat{x}_k est l'état prédit par le modèle à l'instant k . On parle alors de **système anticipatoire faible**.

Les systèmes anticipatoires sont-ils réalisables dans une machine ? Décrivons une classe simple de systèmes anticipatoires introduits par Ekdahl : ils comprennent un système dynamique causal S (i.e., non anticipatoire), auquel on associe un autre système dynamique M , qui est un modèle de

⁴ ceci correspond en fait à l'anticipation étudiée par Rosen.

S . Il est nécessaire que la séquence des états de M soit paramétrée par une variable de temps qui va plus vite que le temps réel de telle façon que le comportement de M prédit le comportement de S . M est équipé de plusieurs effecteurs E qui lui permettent d'opérer directement sur S ou sur les informations de l'environnement perçues par S de telle façon à changer le comportement de S . Si S est modifié, les effecteurs E doivent également modifier M . Il existe donc une sorte de lien causal entre M et S similaire à celui qui peut exister dans les architectures réflexives. Généralement M n'est pas un modèle parfait de S et le système est donc de type anticipatoire faible.

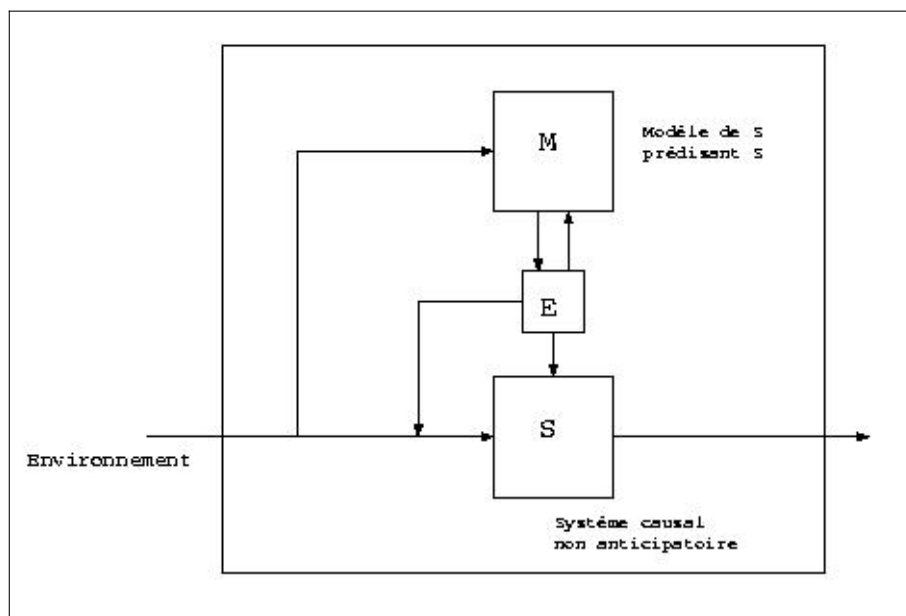


Figure 1 Une classe de système anticipatoire selon Rosen

À première vue, du fait de l'ensemble de ces contraintes, la classe des systèmes anticipatoires semblent être une classe difficilement opérationnalisable. Néanmoins, plusieurs architectures logicielles existantes possèdent des propriétés d'anticipation. Davidsson et Ekdahl ont les premiers implémenté le modèle de Rosen dans une architecture multi-agent (Davidsson Paul, 1996).

Ekdahl décrit un système anticipatoire basé sur une description comme une sorte de base de données qui accumule des informations sur son environnement. Cette description est en fait assez proche du paradigme d'apprentissage introduit par John H. Holland, le père des algorithmes génétiques : les systèmes de classeurs (Learning Classifier System). Une forme de classeur anticipatoire a par exemple été implémenté à partir des travaux de psychologie cognitive d'Hoffman (1992) que nous avons évoqués précédemment. L'apprentissage s'effectue en comparant les anticipations de l'agent avec le résultat réel de ses actions. Les modèles issus de l'approche LCS (Learning Classifier System) sont néanmoins limités car ils présupposent un environnement markovien, c'est-à-dire dans lesquels il n'y pas d'autres agents. Il faudrait pouvoir les simuler de manière interne par un modèle hiérarchique. Dubois (Dubois Daniel M., 2001) a montré également que de nombreux systèmes physiques ou sociaux peuvent être compris comme des systèmes anticipatoires: par exemple, les équations de l'électromagnétisme de Maxwell ou les modèles épidémiologiques. L'anticipation est donc bien au cœur des systèmes complexes, ce que l'on pourrait reformuler par : la finalité est implicitement enchassée dans tout système (Dubois Daniel M., 1999) et il est nécessaire de la prendre en compte si on désire la simuler.

3 Discussions

3.1 Relation de modélisation de Rosen et simulation ?

À première vue, sur l'échelle du temps, anticipation et simulation sont deux concepts orthogonaux : l'anticipation s'intéresse aux états du futur alors que la simulation s'intéresse aux états du passé. L'étape de modélisation semble néanmoins nécessaire à la fois pour l'anticipation et la simulation. On a vu précédemment, que les systèmes complexes sont fondamentalement des systèmes anticipatoires donc si on veut simuler des systèmes complexes, il faut prendre en compte cette composante prédictive. Un exemple d'utili-

sation de l'anticipation dans une simulation est fournie par (Kindler Eugen, 2000) qui décrit une simulation de transport de containers. Les composants doués d'anticipation sont ici les travailleurs qui s'évitent les uns les autres en prédisant ce qui va se passer et qui munis de cette information choisissent leurs stratégies.

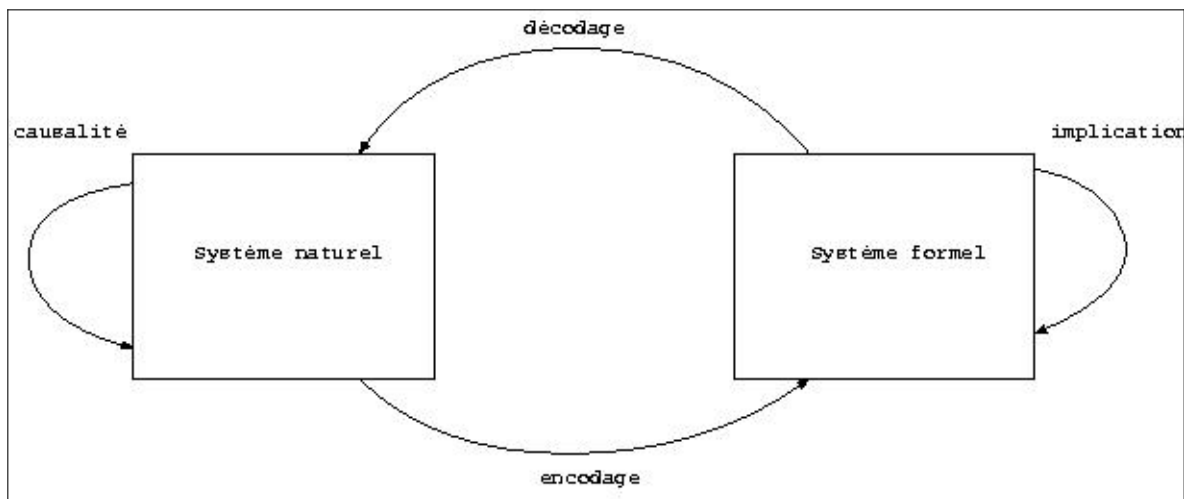


Figure 2 La relation de modélisation de Rosen

Si on veut pouvoir situer la simulation par rapport à l'approche de Rosen, il faut expliciter la simulation dans le cadre de **la relation de modélisation de Rosen**. La relation de modélisation est l'outil qu'à construit Rosen dans l'ensemble de son œuvre pour représenter comment nous faisons de la science, i.e. comment nous interprétons les objets du monde. La relation de modélisation de Rosen consiste à mettre en correspondance un système naturel avec un système formel. Le système naturel consiste en composants que l'on identifie, dont on parle pour former un système formel. Le système naturel existe et a un comportement qui peut être observé par un processus de mesure. L'évolution temporelle de ce système est généralement mis en correspondance avec la causalité. Le système formel au contraire a des composants sous la forme d'éléments qui sont des axiomes ou des théorèmes animés par un mécanisme inférentiel logique ou algorithmique. Les processus de mis en relation d'encodage et de décodage des deux systèmes sont

utilisés par les scientifiques pour vérifier notamment que les prédictions d'un système correspondent à l'autre. Rosen a fondé cet outil sur la théorie des catégories.

Du point de vue de la causalité, dans une simulation, causes efficiente et matérielle sont confondues dans la machine. Alors que c'est cette distinction que Rosen utilise pour empêcher une régression infinie. Rosen dit qu'une simulation aussi élaborée soit-elle ne peut s'approcher de la véritable complexité de la vie. Rosen définit même un être vivant comme ce qui ne peut être simulé⁵. En bref, si on simule la vie sur une machine, ce n'est pas la vie. Dans une simulation, la phénoménologie d'un processus est exécutée sur un support matériel autre que celui de départ (indépendamment du processus simulé). Quelques informations concernant la causalité du phénomène de départ sont irrémédiablement perdues lors de cette simulation. Par exemple, dans une simulation informatique, les aspects fonctionnels deviennent le programme et les entités mesurables les données.

3.2 Modélisation hiérarchique pour la simulation

Si on veut pouvoir simuler des systèmes disposant d'aspects anticipatoires, il est nécessaire d'avoir une modélisation hiérarchique. Un tel outil de modélisation existe déjà pour la simulation : le formalisme DEVS (Discrete Event system Specification), conçu par Zeigler (Zeigler B. P., 1990) afin d'avoir une théorie rigoureuse pour la modélisation et la simulation à événements discrets. DEVS permet la description du comportement d'un système à deux niveaux : à un bas niveau, un DEVS atomique décrit le comportement autonome d'un système à événements discrets comme une séquence déterministe de transitions entre des états et comment il réagit à des entrées externes (événements) et comment il génère des événements en sortie. À un niveau plus élevé, un DEVS couplé décrit un système

⁵ non pas de manière axiomatique, mais fondé par son travail de réflexion. Pour Rosen d'ailleurs, l'anticipation est ce qui permet de distinguer une machine, d'un organisme.

comme un réseau de composants (DEVS atomique ou DEVS couplé). Les connections montrent comment les composants s'influencent les uns les autres. Il a été montré que le formalisme DEVS est fermé par clôture de couplage, i.e pour chaque DEVS (atomique ou couplé), il est possible de construire un DEVS atomique équivalent. Cette propriété permet également de construire un simulateur abstrait ou résolveur capable de simuler tout modèle DEVS. Un des intérêts de l'approche DEVS est la modélisation hiérarchique, notamment si on veut pouvoir modéliser des agents.

L'anticipation n'est pas clairement décrite par Ziegler mais est approchée par le concept d'endomorphisme : "We use the term endomorphy to refer to objects in which some sub-objects use models of other sub-objects." Cette définition ne couvre pas la prédiction de futurs états en eux-mêmes, mais l'intention avec les structures endomorphiques est presque la même (i.e décrire des agents intelligents qui doivent planifier leur futur). Dans (Pies Robert, 2001) est décrite une application du modèle DEVS à la simulation d'un robot, un framework et un modèle d'anticipation hiérarchique a été proposé par Einarson (Einarson Daniel, 2001a) pour faire des simulations.

Cette nécessité de modélisation hiérarchique dans la définition des mécanismes de l'anticipation et de la simulation a été également prise en compte dans la thèse de François Girault (Girault F., 2002), qui tente de généraliser le motto de Brooks : "The world as his own model", en proposant que la cognition elle-même soit vue comme un environnement spécifique dans lequel interagissent les différents points de vue d'un agent.

Enfin une dernière évidence de l'intérêt de la modélisation hiérarchique est apportée par certaines expériences de psychologie cognitive : les images mentales, ainsi que les représentations internes peuvent être expliquées comme des simulations (ou émulations suivant Grush) du corps de l'agent et de son environnement. Ceci est montré par un nombre croissant d'évidences neuro-psychologique où l'on met en lumière que les aires corticales sont les mêmes pour la perception et l'anticipation.

3.3 Un modèle linguistique de la simulation ?

D'après Ekdahl, un système doué d'anticipation doit être considéré comme un système linguistique (Ekdahl Bertil, 1999), c'est-à-dire qu'il dispose comme nous l'avons déjà vu à la fois de mécanismes descriptifs et interprétatifs. Par voie de conséquence il ne peut pas être fragmenté et doit être étudié holistiquement. Ceci signifie qu'un système n'est que partiellement descriptible dans un système formel et que seules certaines formes réduites d'anticipation peuvent être implémentées dans une machine.

Ceci peut être mieux compris par la notion de **complémentarité linguistique** introduit par Löfgren (Löfgren Lars, 1989) : tout phénomène qui peut naturellement être considéré comme un langage contient une description et une interprétation qui sont complémentaires. Tout système peut être considéré du point de vue linguistique, c'est-à-dire peut être décrit au moins partiellement dans un langage. Généralement, cette description est à l'extérieur du système et le comportement du système peut être expliqué comme une interprétation de cette description. Pour un ordinateur, le système contient sa propre définition et son interprétation est le résultat de son calcul. De la même façon, un organisme vivant a un génotype (ADN) et un phénotype, où le second est une interprétation du premier. D'après Rosen, un système complexe contient des aspects sémantiques qui ne peuvent être réduits à la syntaxe, qui donc par voie de conséquence ne peut être simulé.

De la même façon, la simulation doit être comprise comme un système linguistique, comportant à la fois des aspects descriptifs et des aspects interprétatifs de l'objet simulé.

4 Conclusion

De la prise en compte de l'anticipation dans les systèmes complexes, on a pu tirer un certain nombre de conséquences à la fois sur l'activité de

modélisation et sur les architectures logicielles des plateformes de simulation.

La simulation seule ne suffit pas à comprendre les phénomènes complexes, car elle décrit les éléments simulés comme trop statiques et indépendants les uns des autres. Il faudrait pouvoir comprendre les phénomènes à partir de leurs dynamiques ou trajectoires et des relations qu'ils tissent avec leurs environnements. Ce qui est intéressant dans l'anticipation, c'est qu'un système est anticipatoire par rapport à un environnement donné. Il est possible pour un système d'avoir la propriété d'anticipation pour un certain type d'environnement et de n'être pas anticipatoire dans un autre contexte. La propriété d'anticipation s'exprime donc plus comme une sorte de possibilité inscrite dans le système (génotype) par exemple sous la forme d'un système de planification qui ne peut s'exprimer que par certains facteurs environnementaux (phénotype). La propriété d'anticipation n'est pas une propriété absolue, mais plutôt une propriété relationnelle.

C'est cela qu'a tenté Rosen de formaliser lorsqu'il a introduit un modèle relationnel de la biologie fondé sur le langage de la **théorie des catégories**⁶.

Francis Heylighen a proposé il y a peu une refondation de la physique en considérant que le problème vient des descriptions de cette-ci en phénomène statique et indépendant, alors qu'il faudrait des descriptions dynamique et holistes (Heylighen Francis, 1990). Cette refondation de la physique pourrait être conduite de la même manière pour modéliser et simuler les systèmes complexes. Au cœur de cette refondation se trouve le problème de la mesure ou de l'observation⁷ et de la construction auto-référentielle par un mécanisme d'amorçage (bootstrap).

Ce papier a tenté de montrer que anticipation et simulation entretiennent des relations complexes qu'il s'agit maintenant d'étudier avec l'auto-réfé-

⁶ On lira avec intérêt sur le même sujet l'introduction de Matthieu Amiguet à la théorie des catégories (Amiguet M., 1998), ainsi que leur application à la théorie des systèmes évolutifs avec mémoire de A. Ehresmann et J.-P. Vanbremeersch. Les travaux de Rosen nécessiteraient d'ailleurs un traitement de fondation et d'élicitation semblable à celui qui été effectué dans ce mémoire.

⁷ Concept également longuement travaillé par Rosen.

rence, la modélisation, la perception, les systèmes hiérarchiques et même la calculabilité⁸, ... et aussi de se poser la question de qu'est-ce qui est simulable avec une machine ? La simulation est maintenant un outil assez répandu dans les communautés scientifiques ou industrielles, alors que l'anticipation par le côté assez non-scientifique de la prédiction est en quête de reconnaissance scientifique. On peut imaginer que l'anticipation devienne un jour complémentaire à la simulation dans la compréhension des phénomènes complexes.

L'auteur remercie Anne Nicolle pour ses relectures et commentaires effectués sur une version précédente de cet article.

⁸ Bien que Rosen semble le croire, l'anticipation n'est pas calculable, comme l'a montré Wolpert (Wolpert David H., 1996) : "one can not build a computer which can, for any physical system, take the specification of that system's state as input and then correctly predict its future state before that future state actually occurs.". Bien sûr, dans la plupart des situations, on n'a pas forcément besoin d'une anticipation parfaite.

Bibliographie

- Rosen R., (1985). *Anticipatory Systems*. Pergamon Press, Oxford.
- Nadin M., (1999). Anticipation : A spooky Computation. *International Journal of Computing Anticipatory Systems*, 6:3-47.
- Dubois Daniel M., (1999). Review of Incurive, Hyperincurive and Anticipatory Systems - Foundation of Anticipation in Electromagnetism. In Dubois Daniel M., , editor, *Computing Anticipatory Systems : CASYS'99 - Third International Conference*. , American Institute of Physics, AIP Conference Proceedings.
- Tolman Edward C., (1932). *Purposive behavior in animals and men*. Appleton, New York.
- Seward J.P., (1949). An Experimental Analysis of Latent Learning. *Journal of Experimental Psychology*, pages 188-186.
- Hoffmann Joachim, (1993). *Vorhersage und Erkenntnis*. Hogrefe.
- Kelly G.A., (1955). *The Psychology of Personal Constructs*. Norton, New-York.
- Heinze A., , Stephan V., , Surmeli D., and Gross H.-M., (1999). A Cortical Architecture for Parallel Anticipation of Sensorimotor Sequences. In *Proceedings of International Conference on Artificial Neural Networks (ICANN)*, pages 407-412.
- Windeknecht T.G., (1967). Mathematical systems theory: Causality. *Mathematical Systems Theory*, 1(4):279-288.
- Castelfranchi Cristiano, (1994). Guarantees for Autonomy in Cognitive Agent Architecture. In Wooldridge Michael J, and Jennings Nicholas R., , editors, *ECAI-94 Workshop on Agent Theories, Architectures, and Languages*, number 890 in Lecture Notes in Artificial Intelligence, pages 56-70. , Springer Verlag.
- Edmonds Bruce, (2000). Towards Implementing Free-Will. In *Proceedings AISB2000 Symposium on "How to build a functioning mind"*.
- Ekdahl Bertil, (1997). Classification of Anticipatory Systems. In *1st World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics*.
- Ekdahl Bertil, (1999). Anticipatory Systems as Linguistic Systems. In Daniel M. Dubois, , editor, *Computing Anticipatory Systems*. , American Institute of Physics Conference Proceedings.
- Ekdahl Bertil, (2000). Agents as Anticipatory Systems. In *4th World Multiconference on Systemic, Cybernetics and Informatics (SCI 2000) and 6th International Conference on Information Systems analysis and Synthesis (ISAS 200)*.
- Davidsson Paul, (1996). A Linearly Quasi-Anticipatory Autonomous Agent Architecture : Some preliminary experiments. In *Distributed Artificial Intelligence Architecture and Modelling (Lecture Notes in Artificial Intelligence)*, pages 189-203. , Springer Verlag.
- Dubois Daniel M., (2001). Theory of Incurive Synchronization and Application to the Anticipation of a Chaotic Epidemic. *International Journal of Computing Anticipatory Systems*, 10:3-18.

- Kindler Eugen, (2000). Simulation of Systems with Imagining Components. In Christoph Urban, , editor, *Agent-Based Simulation Proceedings, Workshop 2000.* , SCS-European Publishing House.
- Zeigler B. P., (1990). *Object-Oriented Simulation with Hierarchical, Modular Models.* Academic Press, San Diego.
- Pies Robert, (2001). *Simulation and Investigation of Embodied Autonomous Robots Driven by Homeokinetic Control.* PhD thesis, Universität Leipzig, Fakultät für Mathematik und Informatik.
- Einarson Daniel, (2001a). Hierarchical Models of Anticipation. In *CASYS'2001.*
- Girault F., (2002). *L'environnement comme espace de cognition dans les systèmes multi-agents.* PhD thesis, Université de Caen.
- Löfgren Lars, (1989). Complementary in Systems Thinking. In *Proceedings of the European congress on system science, part I,* pages 293-316, Lausanne. AFCET.
- Amiguet M., (1998). Introduction à la théorie des catégories. Master's thesis, Université de Neuchâtel.
- Heylighen Francis, (1990). A Structural Language for the Foundations of Physics. *International Journal of General Systems*, 18:93-112.
- Wolpert David H., (1996). An incompleteness theorem for calculating the future. Technical Report, Santa Fe Institute.

Réflexions sur la Théorie de la Simulation

Mamadou K. Traoré et David R.C. Hill

LIMOS CNRS UMR 6158

Université Blaise Pascal, BP 10125, 63177 Aubière Cedex, France

E-mail: traore@isima.fr, hill@isima.fr

Résumé

Nous entamons une réflexion sur les notions de système, de modèle et de simulation. Le contexte général de cette réflexion est l'activité de Modélisation et Simulation (M&S), qui concerne l'étude des systèmes complexes au moyen d'un programme informatique capable de simuler la dynamique (i.e. le comportement dans le temps) de ces systèmes. Qu'entend-on par système complexe et comment concevoir un programme qui simule sa dynamique ? La notion de cycle de vie, pertinente dans le cadre d'une activité de génie logiciel, permet de résumer toute la problématique du domaine. Il est possible d'articuler autour de ce cycle de vie, l'ensemble des questions fondamentales dont les réponses constituent le champ théorique de la simulation. En plus des aspects épistémologiques, nous discutons des aspects méthodologiques, et proposons une synthèse sous forme de méta-typologie de modèles et de démarche générique de conduite du processus M&S.

Mots clés : Systèmes complexes, Simulation, Epistémologie, Cycle de vie M&S (Modélisation et Simulation), Processus M&S.

1. Systèmes, Modèles et Simulation

Pour tout chercheur, par définition spécialisé dans un domaine, il convient souvent de prendre du recul, de réfléchir et d'étudier de manière critique "sa science" en tant que telle. Le produit de nos recherches en simulation, de nos discours sur la modélisation, sur nos domaines de recherche appliquée, est provisoire. Il faut à juste titre s'interroger sur les conditions dans lesquelles se forment nos connaissances, sur la cohérence des principes qui les gouvernent, sur l'ajustement des méthodes aux objets que nous étudions, sur le fondement de nos déductions et de nos interprétations des résultats produits par nos simulations.

Quelle que soit l'approche préconisée et les connaissances élaborées, celles-ci gardent toute leur valeur lorsqu'elles restent dans un même contexte, avec des définitions qui cherchent tant bien que mal à être en adéquation avec la réalité [Blanché 1972]. Concrètement on ne peut faire de la physique sans faire de la métaphysique ; notre discours se fonde sur des concepts qui semblent s'imposer de manière évidente, mais qui en fait ne sont ni simples, ni triviaux à étudier car ils

dépassent (meta) l'observable (physique) [Bartoly 1990]. Les principes où les concepts que nous manipulons en simulation sont essentiellement les systèmes, les modèles et le temps.

L'objet de nos études de simulation est en fait un système. La notion de *système* embrasse une grande variété d'objets : système d'équations, système naturel, système mécanique... Aussi, une définition unique du terme système est-elle malaisée à trouver. La définition suivante pourrait à la rigueur convenir à l'ensemble des entités que nous reconnaissons comme des systèmes : *un système est une collection d'objets en interactions* [Coquillard et Hill 1997]. La définition du système par ses limites procède donc d'une dialectique observateur-système réel. C'est pourquoi [Cellier 1995] donne une définition restrictive du système, lequel est conçu comme une portion du système réel perçue au travers du prisme de l'expérimentation scientifique : « *Environnement virtuel ou réel perçu comme une source de données ou de comportements observables. Ces données sont vues ou acquises au moyen d'un protocole expérimental intéressant le modélisateur.* ».

Les confrontations avec des situations complexes de type naturel (physique, chimie, biologie, écologie, médecine, géographie,...) amenèrent les premiers travaux sur la notion de système et sur la systémique en général [Le Moigne 1977 & 1990], [Von Bertalanffy 1987], [Simon 1991]. Ces réflexions furent ensuite adaptées aux problèmes d'ingénierie, d'architecture, d'économie, d'organisation... En effet, pour toutes les situations où apparaissent des difficultés de compréhension, de prise de décision individuelle ou collective, il convient d'essayer d'étudier le système qualifié de "complexe". Par opposition à un système qualifié de "compliqué" qui peut être compris en le décomposant en éléments simples analysables séparément (approche réductionniste classique), un système qualifié de "complexe" ne peut pas se réduire à la somme de ses parties [Atlan 1979]. Dans son ouvrage sur l'apprentissage de la complexité, Gérard Clergue [Clergue 1997] terminait son chapitre sur l'apprentissage par simulation par le paragraphe suivant : « *En résumé, la simulation est la seule façon d'aborder de plain pied la connaissance des systèmes complexes dont l'archétype pourrait être fourni par les écosystèmes* ». Et pour simuler un système nous avons besoin d'un « modèle » de ce système.

La notion de modèle n'est pas récente en science. Ainsi le modèle astronomique héliocentrique de Copernic révolutionna-t-il la conception géocentrique d'inspiration aristotélicienne et judéo-chrétienne. Le modèle copernicien fut lui-même par la suite remplacé par le modèle planétaire actuel de notre système solaire. On le voit aisément, les modèles ne sont pas destinés à survivre indéfiniment. C'est qu'ils représentent, à un instant donné, la somme des connaissances accessibles afférentes à un domaine particulier. Que l'expérimentation ou l'observation viennent à prendre en défaut le modèle, et tout est à recommencer... Il s'agit là du processus même de l'avancement de la science. Poser une hypothèse (ou une série

d'hypothèses) relative à un phénomène observable et mesurable fonde l'acte de la modélisation. L'ensemble des observations ultérieures du système réel en fonctionnement permettra la validation ou l'invalidation du modèle. La notion de modèle est si intimement liée à la pensée scientifique que nous pouvons nous surprendre très souvent à confondre modèle (l'idée que nous nous faisons de...) et réalité, au point que cette prise de conscience nous demande parfois quelques efforts. Le terme de modèle a la même signification que celui de concept ou d'hypothèse ou d'analogie. En un mot, *un modèle est une abstraction qui simplifie le système réel étudié* en ignorant de nombreuses caractéristiques du système réel étudié, pour se focaliser sur les aspects qui intéressent le modélisateur et qui définissent la problématique du modèle. Nous retenons la définition suivante de Minsky qui à notre sens reste la plus large que nous ayons trouvé :

« To an observer B, an object A is a model of an object A to the extent that B can use A* to answer questions that interest him about A »* [Minsky 1965].

Quand à la simulation, elle associe étroitement modèle et temps. Lorsque le modèle est observé d'une façon ou d'une autre au cours du temps, lorsque celui-ci est comme "plongé dans le temps" nous réalisons une simulation, où le modèle dans des conditions expérimentales particulières et limitées, se comporte "comme" (simul) le système réel (existant ou à concevoir). Nous retenons donc la définition suivante de la simulation [Hill 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. »

Le concept de système recouvre en fait deux réalités en simulation : l'organisation elle-même qui existe et évolue dans le temps, et le modèle construit pour l'étudier, et qui, du fait qu'elle se compose de plusieurs entités en interaction, est lui aussi un système. C'est pourquoi, il n'est pas rare de rencontrer dans la littérature consacrée au domaine, l'expression « *système de simulation* » pour désigner le dispositif complexe mis en place dans le but de représenter et d'étudier le réel. Nous retenons cette terminologie en raison de son caractère très général.

Afin d'approfondir notre réflexion critique sur la simulation, en s'efforçant d'utiliser notre raison pour séparer le cohérent et l'incohérent, nous proposons à partir des travaux majeurs du domaine, un cycle de vie de la modélisation et de la simulation qui tente de répondre aux questions majeures qu'un expert en simulation est en droit de se poser tout en essayant d'établir les limites de nos connaissances.

2. Cycle de vie M&S

Un système de simulation doit être, in fine, un produit logiciel. Son élaboration s'inscrit donc dans un cycle de vie, conformément à l'un des principes fondamentaux du Génie Logiciel. Depuis les travaux fondateurs de Nance [Nance 1994], quelques travaux majeurs se sont intéressés à la conceptualisation de tout ou une partie de ce cycle de vie [Zeigler 1976], [Zeigler et al. 2000], [Fishwick 1995], [Monsef 1997]. Le schéma générique qu'il est possible de retenir est une activité triphasée (comme l'illustre la Figure 1), dont la finalité est l'aide à la décision pour un large champ de domaines d'application.

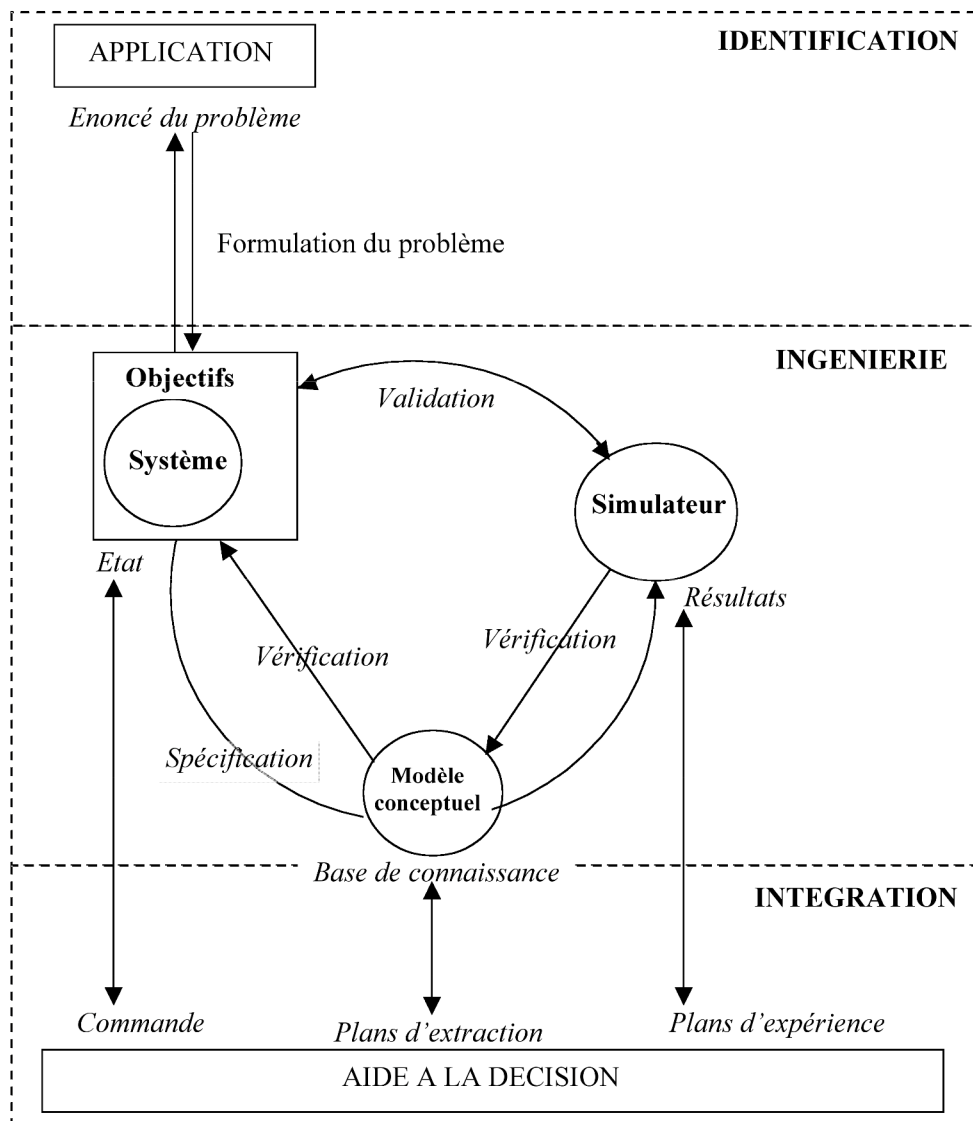


Figure 1. Cycle de vie M&S

La phase d'identification, qui est l'amorce d'une étude de simulation, commence par l'annonce d'un problème à partir d'un domaine d'application donné. Elle implique la formulation de ce problème à travers les deux volets que sont, d'une part, l'identification du système concerné (entités du système, règles de fonctionnement, contraintes, etc.), et d'autre part, l'élucidation des questions à résoudre (optimiser le

fonctionnement, évaluer les performances d'une configuration de système, prédire le futur d'un système à partir d'une situation, etc.). Cette phase est conduite par des échanges entre les experts du domaine d'étude et les concepteurs de solutions ; l'élucidation de questions et l'identification du système peuvent être conduites, de manière séquentielle, ou plutôt parallèle, parfois en alternance. La connaissance résultant de cette phase est de deux sortes :

- une connaissance quantitative qui rassemble les données numériques issues de mesures physiques et/ou d'observations faites sur le système, ou encore extraites des expertises du domaine d'application, et
- une connaissance qualitative qui réunit les éléments comportementaux et structurels du système jugés pertinents au regard des objectifs de l'étude.

La phase d'ingénierie est une phase itérative, d'élaboration du système de simulation, à partir des connaissances identifiées. Elle implique une démarche de spécification d'une représentation conceptuelle et valide du système et de ses objectifs, puis de traduction de cette représentation en un programme informatique exécutable (bien que la représentation conceptuelle et le programme exécutable soient tous deux des modèles, il est fréquent que la littérature, par abus de langage, entende par modèle, l'aspect conceptuel, et par simulateur, l'aspect exécutable). Une démarche de vérification est appliquée tout au long de ces niveaux successifs de spécification, pour s'assurer que le modèle est représentatif du problème posé et que le simulateur se comporte conformément à cette représentation. Une démarche de validation est mise en œuvre pour attester de la crédibilité des résultats obtenus par le simulateur, au regard du système et des objectifs d'étude. A ce stade, il est possible que les connaissances qui se sont avérées manquantes ou incorrectes puissent être évaluées et ajustées par calibrage.

La phase d'intégration plonge le système de simulation dans un dispositif de prise de décision (l'homme ou/et un dispositif informatisé de pilotage). Les décideurs peuvent interagir avec ce système selon trois axes :

- proposer des plans d'expériences, et (ré)utiliser les résultats de simulation pour résoudre le problème posé (et d'autres problèmes de la même classe) ;
- extraire des connaissances à partir de la base de connaissance statique qu'est le modèle conceptuel ;
- envoyer des commandes de pilotage au système physique (si ce dernier existe) ou de conception (si le système est à reconfigurer, ou même à concevoir) ; dans le premier cas, il s'agit d'un système de pilotage à base de simulation, qui doit de manière répétitive, récupérer l'état du système physique, initier une campagne de simulation, analyser les résultats de cette campagne, et produire de nouvelles commandes pour le système physique ; dans le second cas, les commandes sont remplacées par des plans de conception et de configuration.

3. Phase d'identification

Les travaux de Sadowski font apparaître l'importance de la phase d'élucidation du problème (donc de pertinence d'utilisation de la simulation), en amont de la construction du système de simulation [Sadowski 1989]. Elle se résume en deux questions fondamentales :

- Quel est le problème à résoudre ?
- En quoi la simulation est-elle adaptée à sa résolution ?

La question de l'énoncé du problème amène celle du type de problèmes abordés. La notion de système complexe est au cœur de cette question, ainsi que l'identification des domaines d'application, générateurs de problèmes qui font apparaître de tels systèmes. La question de l'adéquation de la simulation comme moyen de résolution, pose, elle, celle du rôle de la simulation, dans un contexte global. Cet aspect transparaît à travers l'identification (du système et) des objectifs d'étude.

3.1. *Enoncé du problème*

Un problème complexe inclut un système réel et une ou plusieurs questions auxquelles l'étude tente de répondre. L'expression " système réel " est une vue de l'esprit, dans la mesure où le système en question peut ne pas exister. Le qualificatif " réel " est utilisé pour distinguer l'objet de l'étude de sa représentation. C'est pourquoi l'expression " problème réel " est également utilisée. Le réel désignera de manière indifférente le problème réel ou le système réel.

Les problèmes réels suffisamment complexes pour nécessiter l'usage de la simulation sont au cœur d'un grand nombre de disciplines, issues des sciences de la terre et de la vie, des sciences sociales et humaines, des sciences de l'ingénieur, ou encore des sciences économiques et de gestion. Parmi eux, citons :

- l'évaluation des performances permet d'extraire une connaissance quantitative du comportement des systèmes, et sert souvent les besoins de méthodes de prescription hybrides entre la simulation et les techniques itératives décisionnelles (dimensionnement de systèmes de télécommunication, de réseaux informatiques, de systèmes manufacturiers, de réseaux de transport, etc.) ;
- les simulations dite de Monte Carlo sont souvent utilisées pour la résolution de modèles de type éléments finis, comme ceux rencontrés en physique, en mécanique des fluides, en génie civil, etc. ;
- le temps réel, dans le cas de simulations très rapides, permet d'implanter un module décisionnel correctif très interactif avec le système physique qu'il pilote ;
- la réalité virtuelle est à but d'entraînement et d'apprentissage au moyen d'un modèle de simulation et à travers une représentation graphique animée (ouvrant

- une large voie dans la médecine, la robotique, l'aéronautique, les applications militaires, la logistique des situations d'urgence, etc.) ;
- la vie artificielle procède d'une approche prospective par simulation, qui est génératrice de mondes nouveaux, et qui, au delà du débat sur la légitimité des modèles manipulés, est à la base de l'exploration d'univers émergents.

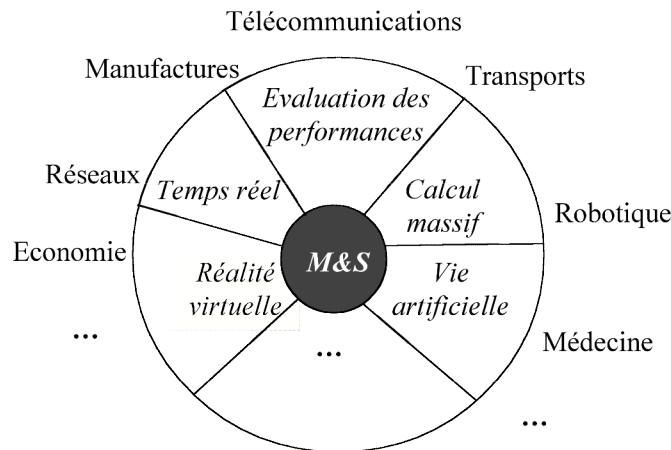


Figure 2. *M&S, domaine de très grande interdisciplinarité*

Une des préoccupations majeures, en matière de conception de programmes de simulation, est celui de s'adresser à des classes de systèmes, plutôt qu'à des systèmes spécifiques. Deux démarches sont, en général, adoptées :

- une démarche ascendante, où à partir de l'expérience acquise par modélisation de plusieurs systèmes, apparaît la nécessité de formaliser un dénominateur commun à ces systèmes, pour lequel il est possible de définir des outils et des méthodes. Ainsi, certains travaux de recherche se consacrent à la définition de modèles génériques pour de larges classes de système [Adiga et Glassey 1991], [Merkuryeva et Merkuryev 1994], [Artiba et Elmaghraby 1996] ;
- une démarche descendante, où l'analyse du domaine d'application de l'étude est préalable à la modélisation du système. D'importants efforts de recherche ont concerné l'analyse de domaine [Arango et Prieto-Diaz 1991], [Hill 1993], [Lefrançois et Montreuil 1994]. Ces efforts tendent à faciliter l'identification du système et du problème dont l'étude est en cours comme instance d'un groupe dont la problématique en matière de simulation a été cernée.

Une autre manière de situer la simulation par rapport aux types de systèmes et de problèmes qu'elle traite, réside dans la partition entre systèmes à flux discret, systèmes à flux continu, et systèmes hybrides. Des méthodes et outils de M&S ont été largement développés pour chacune de ces grandes classes de systèmes [Cellier 1991], [Fishwick 1995], [Zeigler 2000]. Depuis les travaux unificateurs en matière de multiformalisme, cette différenciation a tendance à s'estomper et à se fondre dans un cadre global de simulation des systèmes à flux.

3.2. *Système et objectifs*

Dès le milieu des années 70, Shanon a situé le rôle de la simulation dans deux cadres généraux [Shanon 1975] :

- simuler pour comprendre (vue quantitative), et
- simuler pour résoudre (vue qualitative).

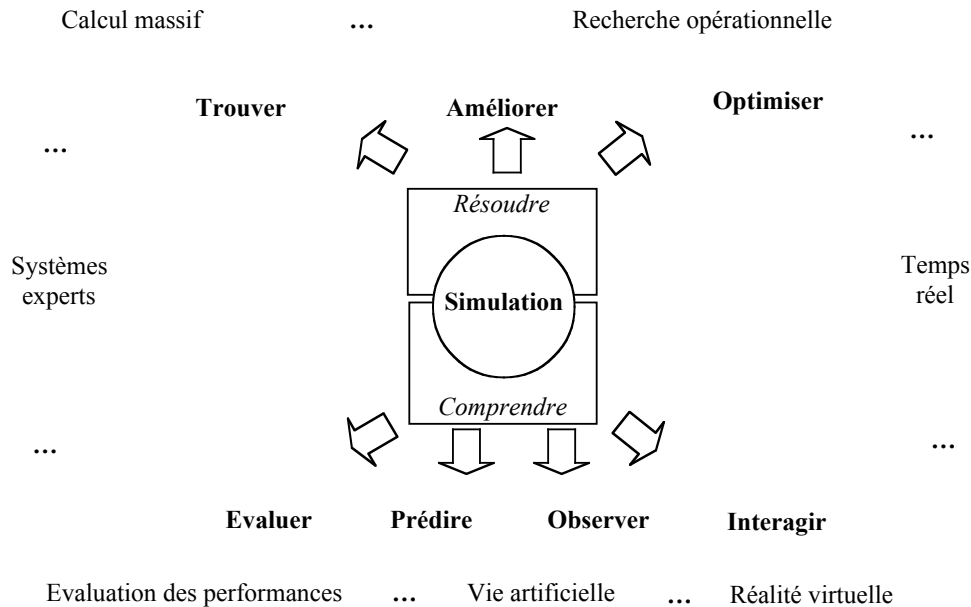


Figure 3. *Rôles de la simulation*

La compréhension d'un système pourrait se décliner en quatre fonctions :

- Observer (passivement) le système, assimiler son mode de fonctionnement nominal, comprendre certains liens fondamentaux existant entre les entités qui le composent ou entre les événements qui prennent place en son sein.
- Évaluer les performances du système, en quantifiant certains critères internes au système à partir d'une situation initiale donnée.
- Prédire le futur du système dans sa structure et dans son fonctionnement. Pour un système conçu par l'homme, il s'agit généralement de savoir comment le système pourrait réagir dans des situations particulières ne correspondant pas un fonctionnement nominal. Pour un système naturel, il s'agit d'un travail de prospective visant à mettre à jour des futurs parfois insoupçonnés [Simon 1991].
- Interagir, i.e. observer activement le système en faisant partie du modèle. Il s'agit en fait d'évaluer des stratégies, parfois élaborées en temps réel.

Résoudre un problème, c'est répondre aux questions qui motivent l'étude. Une démarche de résolution par simulation s'inscrit dans une des trois visées suivantes :

- Trouver, i.e. déterminer la configuration ou les paramètres de fonctionnement qui permettent d'atteindre le but visé (il peut s'agir, par exemple, du compromis vitesse/consommation à trouver pour un appareil soumis à un problème de type distance/temps à respecter).
- Améliorer, i.e. accroître le rendement d'un système par action isolée sur un paramètre, ou par actions conjuguées sur plusieurs paramètres.
- Optimiser, i.e. atteindre l'accroissement maximal de rendement. La nature du problème amène souvent à restreindre les ambitions à une simple amélioration (l'optimum pouvant être atteint, sans que la preuve ne puisse en être établie).

4. Phase d'ingénierie

Cette phase concerne la construction du système de simulation. Les trois questions suivantes en résument les grands objectifs :

- Quelle description (représentation) pour le système étudié ?
- Quelle prescription (schéma de résolution) pour le problème posé ?
- Quelle crédibilité (validité de la représentation et du schéma de résolution, et degré de confiance associé) pour la solution adoptée ?

La réponse globale à ces questions est apportée à travers le concept de processus M&S dont la notion de modèle est la pierre angulaire. En effet, la phase d'ingénierie met en œuvre un processus itératif de spécification visant à aboutir, en partant du réel, au programme de simulation. Le modèle conceptuel et le simulateur sont deux niveaux de représentation différents de ce processus.

4.1. *Modèle et connaissance*

La notion de modèle est au cœur de la simulation. Un modèle, au sens large, permet d'obtenir de l'information au sujet d'un système. Le modèle et le système qu'il représente peuvent, l'un comme l'autre, être réels ou simplement conceptuels, faits d'entités physiques ou décrits dans un formalisme scientifique. L'élaboration d'un modèle exige l'adoption d'au moins une des politiques suivantes :

- Réduction de la taille du réel ; les modèles manipulés sont des modèles réduits et la simulation est dite physique. C'est, par exemple, le cas des activités en soufflerie ou en bassin dans l'aéronautique ou dans l'industrie automobile.
- Représentation du réel dans un formalisme plus simple à appréhender ; les modèles, comme la simulation, sont dits analogiques. Des exemples significatifs dans les secteurs industriels précités sont l'utilisation d'environnements virtuels de pilotage capables de reproduire les situations du monde réel (simulateurs de vol, simulateurs de conduite automobile, etc.). Les simulations numériques, très

utilisées par les physiciens, appartiennent elles aussi à cette catégorie. Les modèles analogiques réputés les plus abstraits sont les modèles digitaux, i.e. les programmes informatiques. Notons ici, que le qualificatif « analogique » est utilisé au sens « analogue », et non au sens « analogique » inspiré du domaine de l'Electronique (où il est question de simulation analogique, lorsque les modèles mis en oeuvre sont constitués de composants électroniques interconnectés, et de simulation numérique lorsque des séquences de bits sont utilisés).

- Simplification de certains aspects complexes du réel, soit par omission, soit par agrégation. Dans le premier cas, les éléments jugés insignifiants dans leur rôle par rapport au problème à étudier ne sont pas pris en compte dans le modèle ; dans le second cas, les éléments jugés insignifiants dans leur détail sont regroupés en un ensemble fonctionnel dont le comportement résume la somme des comportements de ces éléments. La simplification est un pendant de la simulation, et elle se retrouve aussi bien au niveau des modèles physiques qu'analogiques (les modèles réduits en soufflerie sont de simples coques, le dispositif de motorisation étant inutile à l'étude de l'aérodynamisme).

En fait, l'étude des systèmes complexes recèle plusieurs sortes de complexité :

- celle liée à la compréhension et à la maîtrise des règles comportementales internes de ces systèmes ;
- celle due à la nature même de l'étude c'est-à-dire la difficulté à résoudre la question posée à l'origine de l'étude (problèmes NP difficiles, NP complets, NP durs). Cette dernière difficulté conduit le plus souvent à adopter des démarches itératives à base de simulation ;
- celle relative au coût asymptotique de la solution adoptée (temps d'exécution, ou consommation mémoire), en fonction de la taille des données manipulées ;
- celle concernant l'expression lexicographique de la solution (quantité de code écrit pour exprimer cette solution). Il s'agit de la complexité algorithmique au sens de Kolmogorov (et à sa suite Chaitin) précisant qu'une séquence est algorithmiquement complexe si pour la décrire, il faut un programme long ! [Danchin 1998].

Très souvent, le processus M&S est mobilisé pour aboutir à une simple représentation du système réel (les objectifs identifiés permettant alors de filtrer les entités pertinentes à retenir), et la ou les questions à résoudre sont traitées en dehors du processus, même si elles influent sur les choix de représentation de ce système réel. C'est pourquoi, il est fréquemment question de modèle de simulation comme représentation informatique du fonctionnement du système réel (modèle descriptif). La simulation est vue comme un outil quantitatif, dissocié de et au service de la connaissance de résolution du problème. De manière classique, il s'agit d'un couplage entre la simulation et des outils issus, le plus souvent, de la Recherche

Opérationnelle et de l'Intelligence Artificielle [O'Keefe 1986], [Reddy 1987], [Ören 1989], [Artiba et al. 1998].

Une alternative à l'approche quantitative est l'approche qualitative (figure 4), où la simulation n'est plus simplement une boîte noire utilisée dans un schéma de résolution, mais intègre cette connaissance [Wild et Pignatiello 1994], [Ferber et Drogoul 1992]. C'est souvent dans ce cas que l'on parle de système de simulation.

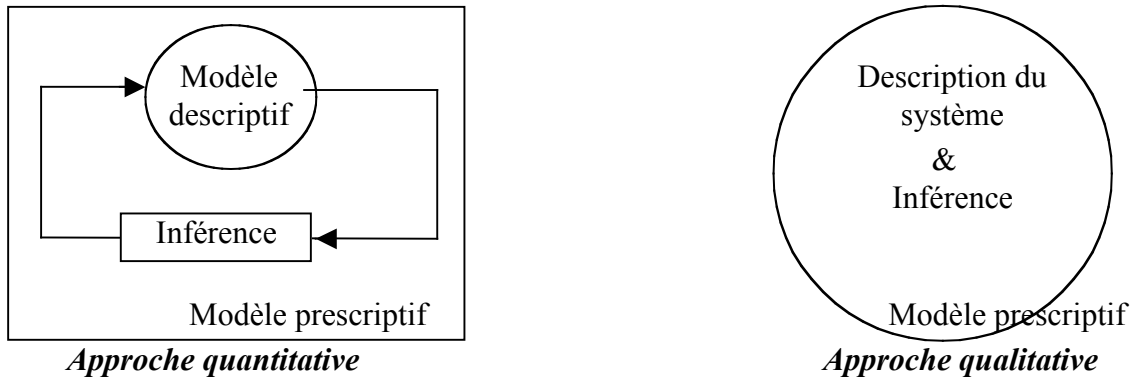


Figure 4. *Approche quantitative versus approche qualitative*

4.2. *Modèle conceptuel*

Comment spécifier un modèle conceptuel ? Il s'agit de décrire toute la connaissance utile, sous ses formes statiques (structure de la connaissance, et données utilisées) et dynamiques (mécanismes comportementaux). Plusieurs formalismes existent à cette fin, qui s'avèrent particulièrement pertinents selon la nature du problème traité (les automates à états finis sont très expressifs pour décrire le comportement des systèmes à événements discrets, les Réseaux de Pétri sont adaptés au cas particulier des processus automatisés, les équations différentielles conviennent à l'expression du comportement des systèmes à flux continu). Les systèmes hybrides nécessitent parfois l'usage de plusieurs formalismes pour traduire leur comportement. Par ailleurs, la structure d'une connaissance et son comportement ne s'expriment pas forcément au moyen d'un même formalisme. D'importants efforts de recherche doivent donc être consacrés aux aspects méthodologiques d'élaboration du modèle conceptuel. Parmi ces efforts, l'un des plus notables est, sans doute, le concept de vue multiple [Zeigler 1984], [Fishwick 1995], dont le principe est de considérer qu'un modèle complexe se spécifie à travers différentes vues et au moyen de différents langages et outils, et dont l'objectif est de définir un cadre unificateur permettant d'encapsuler ces vues.

4.3. *Simulateur*

Comment passer du modèle conceptuel au simulateur ? Cette question concerne l'introduction de la gestion du temps dans la simulation. Les premières techniques développées sont adaptées au contexte où le simulateur est un programme monolithique composé d'un échéancier (liste d'événements à exécuter) et d'un noyau de synchronisation (ensemble de fonctions disponibles pour l'exécution des événements, la gestion de l'échéancier, et la mise à jour du temps de simulation) [Leroudier 1980]. Puis sont apparues des techniques basées sur une partition de la connaissance en unités logicielles ayant une cohérence interne, une temporalité propre, et une autonomie relative vis-à-vis du reste de la connaissance globale, et pouvant s'exécuter sur des hôtes matériels différents. Cette autonomie relative implique des besoins d'échange et de synchronisation entre unités logicielles (messages, appels, activations, priorités, etc.). Ainsi sont nées les approches dites « pessimistes » et « optimistes » [Fujimoto 1990], [Ferscha et Tripathi 1994]. Dans ce contexte, en plus de la difficulté de définir des schémas de synchronisation efficaces, deux autres difficultés existent :

- la recherche de la meilleure partition, au sens de la maximisation du nombre d'unités, conjointement à la minimisation des flux d'échanges inter unités, s'apparente à un problème de partition dans un graphe [Stopper et Böszörményi 1995], problème réputé NP-complet [Gare et al. 1976]. Maximiser le nombre d'unités répond au double besoin d'augmenter le potentiel de simultanéité d'autonomies relatives et d'amoindrir la complexité par réductionnisme ; alors que minimiser les flux d'échanges (option antagoniste) répond au besoin de réduire les coûts de dépendance inter unités ;
- la communication inter unité induit un problème de génie logiciel à travers la nécessité de mise en place d'un protocole de communication, qui est forcément assujéti aux types d'architectures matérielles en jeu. Deux objectifs peuvent être poursuivis : (1) d'une part, définir des standards d'écriture du code effectif dans un langage général ou de simulation [Kreutzer 1986], [MacDougall 1987], et (2) d'autre part, définir des standards de communication inter unités logicielles pour lesquels l'architecture matérielle hôte est transparente. On s'oriente aujourd'hui vers les standards de l'OMG (Object Management Group) et du SISO (Simulation Interoperability Standards Organization) [Tolk 2002]. Par ailleurs, des projets d'environnement de simulation, intégrant des langages de spécification [Martin 1995], [Bagrodia 1994], [Teo et al. 1998] visent à affranchir le concepteur de l'environnement hôte. Une revue des outils, langages et environnements existants est donné dans [Low et al. 1999].

4.4. Crédibilité

Quelle est la validité du modèle conceptuel, et quelle est celle du simulateur ? Un modèle étant un “ perçu ” du réel, il ne reflète pas forcément tous les aspects inclus dans le réel, mais seulement ceux qui ont une pertinence vis-à-vis des questions motivant l'étude. Cette simplification doit toutefois rester valide dans le cadre de l'étude envisagée. Ceci implique la validité de la simplification faite, tant au niveau du système réel (dans sa structure et dans son fonctionnement) qu'au niveau de l'environnement de ce système. Tous les phénomènes physiques n'étant pas invariants à la simplification, la question de la validité d'un modèle est cruciale.

Zeigler a introduit la notion de cadre expérimental pour traduire la dépendance entre l'expression du modèle et les objectifs de l'étude qui l'utilise. Un modèle valide dans son cadre expérimental peut cesser de l'être dans un autre cadre expérimental.

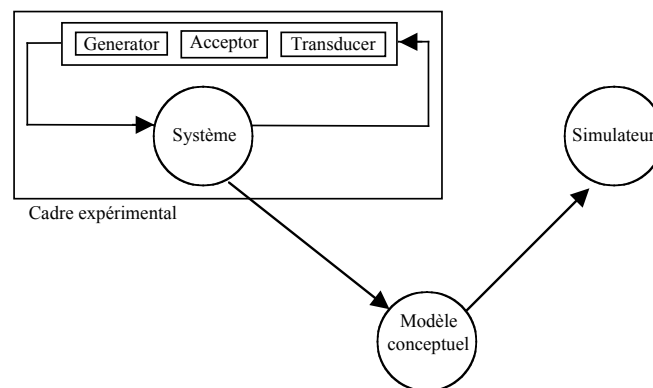


Figure 5. Notion de cadre expérimental

La notion de modèle de base qualifie tout modèle qui est valide dans n'importe quel cadre expérimental. Dans l'absolu, un modèle de base n'est pas concevable. Par contre, en se plaçant dans des contextes très larges, il est possible de constituer des bibliothèques de modèles, adaptables à un grand nombre de cadres expérimentaux. Un modèle de base (ou pseudo modèle de base) issu d'une telle bibliothèque, devient un modèle dit « taillé » dès qu'il est aménagé de manière à s'adapter à un cadre expérimental donné.

Quel degré de confiance accorder à un système de simulation ? La densité d'expérience de recherche, dans ce domaine, a permis d'établir des principes de base, et des techniques associées pour leur mise en œuvre, rassemblés sous l'étiquette de VV&T (Vérification, Validation et Tests), et concernant :

- la vérification (ou validation « amont »), i.e. la conformité du simulateur par rapport au modèle conceptuel (quelques travaux très représentatifs dans ce domaine sont [Balci 1997] et [Robinson 1999], et [Lewis 1993] dans un contexte de simulation parallèle et distribuée) ;

- la validation [Balci 1997], [Robinson 1999], i.e. la conformité du simulateur par rapport au problème réel abordé (la validation “ aval ”).

De manière plus large, la question de la crédibilité devrait s’étendre à tout le cycle de vie M&S, notamment à l’élucidation du problème (dont on doit s’assurer de la bonne formulation), à la faisabilité de la simulation, aux objectifs mis en évidence, et à l’utilisation des résultats obtenus [Kleijnen 1987], [SCS 1979].

5. Phase d’intégration

Comment exploiter un système de simulation ? Trois axes sont possibles :

- utilisation du simulateur, en le mobilisant sur des plans d’expérience dont les résultats, analysés, servent à la prise de décision ; dans certains cas, en l’occurrence lorsque les phénomènes décrits incluent un aspect stochastique, l’analyse des résultats s’accompagne d’une quantification du degré de confiance qu’il leur est accordé (calcul d’intervalles de confiance) ;
- extraction de connaissances à partir du modèle conceptuel, ce dernier étant utilisé comme une base de connaissance partagée entre modeleurs, concepteurs de systèmes physiques réels, experts du domaine et décideurs ;
- pilotage de système, par interaction entre le système réel (qui reçoit des commandes et renseigne en retour sur son état), un système de commande (qui reçoit l’état du système réel et élabore de nouvelles commandes de contrôle du système), et le système de simulation (ce dernier faisant alors partie du système d’information de l’environnement de pilotage, sert à bâtir ou à évaluer les décisions de contrôle), ou ordres de conception ou de reconfiguration du système réel à partir des enseignements obtenus par le système de simulation.

6. Synthèse et méta-approches

Le processus M&cS est le point focal du cycle de vie M&S :

« Perhaps the hardest general problem in simulation is determining the exact method that one should use to create a model. After all, where does one begin? Just as the discipline of software engineering has emerged to address this question for software, in general, modellers also have a need to explore similar issues. How do we engineer models? » [Fishwick 1995].

Notre effort de recherche se concentre sur ce processus de spécification, à travers ses aspects méthodologiques, ses outils et leurs performances. Deux grandes questions en résument la problématique :

- Comment spécifier un modèle conceptuel valide ?
- Comment automatiser le passage de ce modèle à un simulateur correct ?

Force est de constater que cette problématique nécessite un effort de structuration du champ théorique, tant les influences inter disciplinaires sont fortes. Il s'agit, ici, d'abstraire les concepts, méthodes et outils qui s'avèrent indépendants de toute application, et qui prévalent dans toutes les démarches de spécification, aussi éloignées que soient les applications concernées. Quatre concepts clé sont à retenir :

- la séparation des aspects (appelée principe de Dijkstra), i.e. la distinction entre la conception et l'exécution ;
- la séparation des points de vue, i.e. la distinction entre structure et comportement ; la sémantique traduit l'expression unifiée de la structure et du comportement ;
- la spécification incrémentale, i.e. la nature itérative du processus de spécification sous forme d'abstractions ou de raffinements successifs, du problème posé au système de simulation correspondant [Nance 1994] ;
- le principe de multiformalisme et d'intégration des niveaux de spécification, i.e. l'expression d'un modèle sous la forme d'une hiérarchie d'abstractions qu'il est possible de spécifier au moyen de formalismes différents [Fishwick 1995] ; un formalisme est souvent adéquat pour décrire certaines caractéristiques du système, et s'avère insuffisant pour en décrire d'autres.

L'effort le plus remarquable de structuration est, à notre connaissance, celui de Fishwick [Fishwick 1995], qui propose une classification des modèles en : modèles déclaratifs (description sous forme de graphe d'états et de séquences d'événements faisant passer d'un état à un autre), modèles fonctionnels (description sous forme d'enchaînement de blocs fonctionnels où les sorties des uns constituent les entrées des autres et disposés de manière à réaliser le traitement attendu), modèles de contraintes (description sous forme d'équations régissant les contraintes du système), et modèles spatiaux (description sous forme de collection d'entités autonomes inter agissantes). Le cadre qu'il propose pour intégrer ces différents modèles dans un modèle global est celui de l'objet.

Ce travail initie et est inclus dans notre réflexion, dont les grandes lignes sont : (1) une typologie de formalismes, et (2) une méta-méthodologie induite, composée de six phases de spécification (présentées en figure 5) :

- Les modèles d'interface fixent les bornes d'un système (ce qui est considéré comme étant à l'intérieur ou à l'extérieur), et se caractérisent par un ensemble d'architectures unitaires reliées par des mécanismes communautaires (objets et échange de messages, agents et tableaux noirs, modules et couplages modulaires, etc.). Ils facilitent l'intégration de niveaux d'abstraction différents : (1) en fixant

les règles d'interaction entre composants, et (2) en facilitant le passage d'un niveau de description à un niveau de description plus détaillé, pour les composants dont la description requiert un raffinement progressif.

- Les modèles de mécanismes représentent le comportement d'un système; ils sont destinés à être enveloppés dans des modèles d'interface et se traduisent par un ensemble de variables et d'algorithmes opérants, ou par un ensemble d'interfaces et de mécanismes communautaires ; ils sont spécifiés au moyen de formalismes divers (automates à états finis, automates cellulaires, réseaux de Pétri, réseaux de files d'attente, réseaux de neurones, graphes et diagrammes, etc.).
- Les modèles de formalisation expriment la structure et le comportement dans un même formalisme mathématique unificateur; ils permettent de mettre en œuvre des actions de vérification formelle (codes algorithmiques, DEVS).
- Les modèles de partition permettent de définir le schéma d'exécution de la simulation, c'est-à-dire la correspondance entre l'architecture du modèle conceptuel et celle du programme exécutable ; ils concernent les schémas standards de simulation que sont : (1) la partition monolithique (échancier d'événements), (2) la partition en activités, et (3) la partition en processus.
- Les modèles de synchronisation décrivent les mécanismes de synchronisation nécessaires au bon déroulement de la simulation ; ils concernent les techniques de gestion du temps de simulation : (1) simulation séquentielle, dirigée par horloge ou par événements, et (2) simulation distribuée, pessimiste ou optimiste.
- Les modèles d'exécution traduisent la structure et les mécanismes de synchronisation du schéma d'exécution, en programmes exécutables; ils s'appuient sur : (1) les langages généraux (Simula 67, C++, Java, C, Pascal, Ada, etc.), (2) les langages de simulation (QNAP, SIMAN, Simscript, Modsim, etc.), et (3) les bibliothèques de simulation (SimPack, Sim++, SimJava, etc.).

<i>Étapes</i>	I. Conception	II. Exécution
1. Structure	Spécification d'interface	Spécification de partition
2. Comportement	Spécification de mécanismes	Spécification de synchronisation
3. Sémantique	Formalisation de sémantique	Programme d'exécution

Figure 6. Typologie de modèles et méta-méthodologie induite

7. Perspectives

Le domaine de la simulation arrive à un tournant, où les préoccupations s'orientent vers le besoin de bâtir une théorie générale, par abstraction des concepts, principes et méthodes indépendants de toutes les nombreuses applications concernées. Les efforts dans cette optique doivent viser à l'élaboration de méta-approches: « *The ideal is to make a model of the simulation process itself* » [Fishwick 1995].

Notre travail s'inscrit dans ce contexte. Le fil directeur est le cadre OPA (Objectif / Principes / Attributs) qui est issu des projets de recherche en génie logiciel, et qui est basé sur la philosophie suivante : « *Un ensemble d'objectifs définit un projet ; pour les atteindre, il faut respecter certains principes. Le respect de ces principes conduit à un produit ayant des attributs adéquats* ». Les objectifs principaux visés sont : (1) la continuité dans le processus de spécification de système de simulation, et (2) la validité des modèles. Les principes adoptés sont : (1) une typologie de formalismes, et (2) une méta méthodologie qui autorise le multiformalisme et qui facilite le passage d'une abstraction à une autre. Le produit final doit être une plate-forme logicielle, dont les attributs principaux sont : (1) une couche *Conception*, constituée d'une interface graphique utilisateur (exécutable dans un navigateur ou en stand alone) permettant la création, la sauvegarde, la documentation et l'exécution de modèles de simulation, (2) une couche *Exécution*, qui fournit les bibliothèques de classes implémentant les modèles de simulation, et (3) une couche Réseau, qui rend transparent le matériel hôte (station de travail, ou multiprocesseur, ou réseau d'ordinateurs) ; l'environnement web fournit le cadre d'interopérabilité des modèles.

8. Références

- [Adiga et Glassey 1991] Adiga, S., Glassey, C.R. 1991. " Object-oriented simulation to support research in manufacturing systems ". Int. J. Prod. Research, Vol. 29, n°12, p. 2529-2542.
- [Arango et Prieto-Diaz 1991] Arango, G., Prieto-Diaz, R. 1991. " Domain Analysis : Concepts and Research Directions ". In Domain Analysis and Software Systems Modeling, Prieto-Diaz & Arango (Eds), IEEE Comp. Press, Wash. DC, p. 9-32.
- [Artiba et al. 1998] Artiba, A., Emelyanov, V.V., Iassinovski, S.I. 1998. Introduction to Intelligent Simulation : The RAO Language. Kluwer, Boston.
- [Artiba et Elmaghraby 1996] Artiba, A., Elmaghraby, S.E. 1996. Planning and Scheduling of Production Systems. Methodologies and Applications. Kluwer, Boston.
- [Atlan 1979] Atlan H. 1979. Entre le Cristal et la Fumée, Essai sur l'organisation du vivant. Paris, Seuil (Points-Sciences).
- [Balci 1997] Balci, O. 1997. " Principles of Simulation Model Validation, Verification, and Testing ". Transactions, p. 3-12.

- [Bartoly 1990] Bartoly, X. 1990. La Science : Epistémologie générale. Collection philosophie critique, Magnard.
- [Blanché 1972] Blanché, R. 1972. L'Epistémologie. PUF.
- [Cellier 1991] Cellier F.E. 1991. Continuous System Modeling. Springer Verlag.
- [Clergue 1997] Clergue G. 1997. L'apprentissage de la complexité. Hermes, Paris.
- [Coquillard et Hill 1997] Coquillard P., Hill D. 1997. Modélisation et Simulation des Ecosystèmes. Masson.
- [Danchin 1998] Danchin, A. 1998. La barque de Delphes : Ce Que Révèle le Texte des Génomes. Ed. Odile Jacob Sciences. Paris.
- [Ferber et Drogoul 1992] Ferber, J., Drogoul, A. 1992. "Using Multi-Agent Systems in Simulation and Problem Solving". In Distributed Artificial Intelligence: Theory and Practice. Gasser & Avouris (Eds). Kluwer, p. 53-80.
- [Ferscha et Tripathi 1994] Ferscha, A., Tripathi, S.K. 1994. Parallel And Distributed Simulation Of Discrete Event Systems. [Ftp://ftp.cs.umd.edu/pub/papers/Trs/](http://ftp.cs.umd.edu/pub/papers/Trs/)
- [Fishwick 1995] Fishwick, P. 1995. Simulation Model Design and Execution. Building Digital Worlds. Prentice Hall.
- [Fujimoto 1990] Fujimoto, R. 1990. "Parallel Discrete Event Simulation". Comm. of the ACM. 33(10), p. 31-53.
- [Gare et al. 1976] Gare, M., Johnson, D., Stockmeyer, L. 1976. Some Simplified NP-Complete Graph Problems. Theoretical Computer Science.
- [Hill 1993] Hill D.R.C. 1993. Analyse Orientée-Objets et Modélisation par Simulation. Addison-Wesley.
- [Kleijnen 1987] Kleijnen J.P.C. 1987. Statistical Tools for Simulation Practitioners. Dekker (Eds), New York.
- [Kreutzer 1986] Kreutzer, W. 1986. System Simulation Programming Languages and Styles. Addison-Wesley, Reading, MA.
- [Le Moigne 1977] Le Moigne, J.L. 1977. La Théorie du Système Général : Théorie de la Modélisation. Système Décision. PUF.
- [Le Moigne 1990] Le Moigne, J.L. 1990. La Modélisation des Systèmes Complexes. Dunod, Paris.
- [Lefrançois et Montreuil 1994] Lefrançois, P. and B. Montreuil. 1994. "An Object-Oriented Knowledge Representation for Intelligent Control of Manufacturing Workstations". IIE Transactions, 26(1), p. 11-26.
- [Leroudier 1980] Leroudier, J. 1980. La Simulation à Evénements Discrets. Ed. Hommes et Techniques, France.
- [Lewis 1993] Lewis, R.O. 1993. "Verification, Validation, and Accreditation (VV&A) of Models and Simulations used in Distributed Interactive Environment". In Proc. of ESM. Modelling and Simulation, p. 633-636.
- [Low et al. 1999] Low, Y-H., Lim, C-C., Cai, W. Huang, S-Y., Hsu, W-J., Jain, S., Turner, S.J. 1999. "Survey of Languages and Runtime Libraries for Parallel Discrete-Event Simulation". Simulation, 72(3), p. 170-186.
- [MacDougall 1987] MacDougall, M.H. 1987. Simulating Computer Systems : Techniques and Tools. MIT Press, Cambridge.

- [Merkuryeva et Merkuryev 1994] Merkuryeva, G., Merkuryev, Y. 1994. "Knowledge-Based Simulation Systems. A Review". *Simulation*, 62 (2), p. 74-89.
- [Minsky 1965] Minsky M.L. 1965. "Matter, Minds and Models", *Proc. of IFIPC*, Vol 1, p. 45-49.
- [Nance 1994] Nance, R.E. 1994. "The Conical Methodology and the Evolution of Simulation Model Development". *Ann. of Op. Research*, Vol. 53, p. 1-45.
- [O'Keefe 1986] O'Keefe, R. 1986. "Simulation and Expert Systems – A Taxonomy and Some Examples". *Simulation*, 46(1), p. 10-16.
- [Ören 1989] Ören, T.I. 1989. "A Paradigm for Artificial Intelligence in Software Engineering". In *Adv. in AISE*. Ören (Eds). Vol. 1, JAI Press, Greenwich, CN.
- [Reddy 1987] Reddy, R. 1987. "Epistemology of Knowledge Based Simulation". *Simulation*, 48(4), p. 162-166.
- [Robinson 1999] Robinson, S. 1999. "Simulation Verification, Validation and Confidence : a Tutorial". *Transaction*, 16(2), p. 63-69.
- [Sadowski 1989] Sadowski, R.P. 1989. "The Simulation Process : Avoiding the Problems and Pitfalls". In *Proc. of the WSC*, p. 72-79.
- [SCS 1979] SCS Technical Committee on Model Credibility. 1979. "Terminology for Model Credibility", *Simulation*, 32(3), p. 103-104.
- [Shanon 1975] Shanon R. E. 1975. *System Simulation : the Art and Science*, Prentice-Hall, Englewood cliffs, M.J.
- [Simon 1991] Simon, H.A. 1991. "Sciences des Systèmes, Sciences de l'Artificiel", AFCET Systèmes, Dunod.
- [Stopper et Böszörmenyi 1995] Stopper, A., Böszörmenyi, L. 1995. "Acceleration of Distributed, Object-Oriented Simulations Using a Graph-Optimizing Approach". In *Proc. of the 7th ESS*. October 26-28. Erlangen-Nuremberg, p. 387-391.
- [Teo et al. 1998] Teo, Y.M., Tay, S.C., Kong, S.T. 1998. "Structured Parallel Simulation Modeling and Programming". In *Proc. of the 31st ASS*. April 5-9, Boston, MA, p. 135-142.
- [Tolk 2002] Tolk, A. 2000. "Avoiding Another Green Elephant. A Proposal for the Next Generation HLA Based on the Model Driven Architecture". In *Proc. of the 2002 FSIW*, Orlando, Florida.
- [Von Bertalanffy 1987] Von Bertalanffy L. 1987. *Théorie Générale des Systèmes*. Dunod, Paris, France.
- [Wild et Pignatiello 1994] Wild, R.H., Pignatiello Jr., J.J. 1994. "Finding Stable System Designs: a Reverse Simulation Technique". *Comm. of the ACM*, 37(10), p. 87-98.
- [Zeigler 1976] Zeigler, B.P. 1976. *Theory of Modelling and Simulation*. Wiley & Sons Inc., N.Y.
- [Zeigler 1984] Zeigler, B.P. 1984. *Multifaceted Modelling and Discrete Event Simulation*. Academic Press, London and Orlando.
- [Zeigler et al. 2000], B.P., Praehofer, H., Kim ; T.G. 2000. *Theory of modeling and simulation. Integrating discrete event and continuous complex dynamic systems*. 2nd Ed. Academic Press.

La simulation conçue comme expérience concrète

Franck Varenne - Doctorant en histoire des sciences

Centre Inter-universitaire d'Histoire des Sciences et des Techniques - Lyon 2

Adresse personnelle : 187, avenue du Maine - 75014 Paris - fvarenne@wanadoo.fr

Résumé : Par un procédé d'objections/réponses, nous passons d'abord en revue certains des arguments en faveur ou en défaveur du caractère empirique de la simulation informatique. A l'issue de ce chemin clarificateur, nous proposons des arguments à l'appui du caractère concret des objets simulés en science ; ce qui légitime le fait que l'on parle à leur sujet d'une expérience, plus spécifiquement d'une expérience concrète du second genre.

Introduction

Dans un article précédent (2001), nous avons montré que, dans la littérature tant scientifique, philosophique, historique que sociologique, on trouve régulièrement trois grands types de thèses concernant le statut de la simulation par ordinateur. En effet, soit l'on considère la simulation par ordinateur comme une sorte d'expérience, soit, au contraire, on la considère comme un simple outil intellectuel ou théorique, soit, enfin, on la considère comme un moyen nouveau et inédit d'apprendre quelque chose au sujet de la « nature des choses », un moyen intermédiaire – c'est-à-dire un troisième terme – entre théorie et expérience¹.

Nous soutenions également qu'au vu de l'histoire récente des sciences, il n'était pas possible de trancher en général en faveur de telle ou telle de ces trois positions : tout dépend en effet du rôle épistémologique explicite ou implicite donné à chaque fois et dans chaque cas à la représentation formalisée, dans le domaine précis concerné. Par exemple, avec une approche épistémologique de type « Artificial Life », une simulation par ordinateur d'un être biologique quelconque sera considérée comme une expérience à part entière, alors que, dans le cadre d'une autre tradition épistémologique, comme celle

¹ Bien que les définitions des termes « théorie » et « expérience » soient toujours très discutables et très variables (voir les articles de (Nadeau, R., 1999)), afin de bien nous entendre, nous proposerons de considérer ici les définitions très larges suivantes : le terme « théorie » désignera tout système intellectuel (c'est-à-dire constructible par le pouvoir synthétique de la pensée humaine) à visée explicative ou prédictive, alors qu'une « expérience » désignera tout rapport à quelque chose qui tend à nous fournir une information de nature non théorique. Les autres définitions seront insérées dans le corps du texte au fur et à mesure de l'introduction des termes.

de l'agronomie française par exemple, la simulation de la croissance d'une plante à l'aide de L-systèmes pourra, au contraire, être considérée comme purement théorique.

Avec le développement de la simulation informatique et plus seulement numérique, il nous paraît cependant possible de nous pencher plus précisément sur ce qui fait la forme empirique de la simulation alors même que sa matière, ses matériaux en sont formels. Il y a un grand paradoxe à dire qu'une forme soit empirique et qu'une matière soit formelle. Nous pensons que c'est une des raisons pour lesquelles il est difficile de concevoir le statut épistémologique de la simulation.

Pour mettre au jour cette forme empirique prenant naissance au cœur même d'une matière formelle, nous nous proposons de partir d'une définition minimale de la simulation informatique et de rappeler en quoi on a pu voir là quelque chose comme une expérience. C'est alors en proposant une première version de la thèse puis en progressant avec les objections et les réponses à ces objections que nous serons progressivement conduits à reconnaître ce qui, selon nous, fait de la simulation informatique une expérience concrète du second genre.

1- définition minimale et première formulation de la thèse :

Nous laisserons délibérément de côté la définition trop large retenue par la Society for Computer Simulation de John MacLeod. Cette définition – que nous avons nommée S1 dans (Varenne, 2001) - indique que la simulation informatique renvoie à « tout usage de l'ordinateur pour modéliser des choses » (McLeod, 1986). En effet nous ne pensons pas qu'un calcul formel effectué sur ordinateur, par exemple, puisse vraiment être qualifié de simulation.

La définition minimale que nous retiendrons ici décrit la simulation informatique comme un traitement pas à pas par ordinateur soit d'un modèle mathématique sans solution analytique, soit d'un moteur d'inférence à base de règles : automates cellulaires, SMA, modélisation orientée objet. Les premières simulations numériques sur machine électronique, les simulations Monte-Carlo de Von Neumann, Ulam et Metropolis, entrent dans cette définition, comme on le voit.

La première affirmation en faveur du caractère empirique de la simulation pourrait alors partir du constat immédiat que l'on peut tirer de cette définition minimale. Nous pouvons en effet en déduire que la simulation nous apprend toujours quelque chose, à l'image d'un récit

dont on ne connaît pas *a priori* la fin. Certains auteurs ont ainsi assimilé la simulation à une « histoire d'états » à cause du caractère pas à pas de son traitement. L'ordinateur raconterait une histoire, mot à mot, sans donner pour autant la capacité de la résumer. Cette capacité que la simulation possède de passer pour une aventure de l'esprit provient en effet du caractère incompressible de son traitement formel : pour telle simulation particulière, il n'y a pas – dans l'état des connaissances du moment - d'autres chemins intellectuels pour parvenir aux résultats. Et le résultat est dépendant de l'intégralité du chemin. Il faut donc le parcourir pas à pas sans espérer le raccourcir.

2- Objection :

Si l'on ne considère que cet argument de l'incompressibilité, il est facile de lui objecter la persistance du caractère formel, calculatoire donc seulement intellectuel de la simulation informatique. Manfred Stöckler (2000) rappelle ainsi que, même pour le traitement parallèle d'un réseau d'automates, on pourrait imaginer qu'un homme procède de lui-même, par la seule force de son esprit, à ces calculs pas à pas - qui peuvent être ramenés à des calculs séquentiels. L'ordinateur n'est qu'une machine à calculer ! La simulation demeure toujours donc de droit, sinon de fait, intellectuelle. Le fait d'être automatisée et de manipuler une masse considérable de données ne lui ferait pas faire un saut qualitatif. C'est pourquoi Stöckler pense que le statut de la simulation doit se cantonner à celui d'un argument théorique résultant d'un calcul.

3- Réponse :

A cet argument, on peut répondre par la remarque selon laquelle, depuis la construction ou la découverte – si l'on préfère - des théorèmes de limitation des systèmes formels - Gödel, hypothèse de Church, Turing -, il n'est plus tout à fait absurde de parler de mathématiques expérimentales. Avant même la démonstration du théorème des quatre couleurs de 1976, la combinatoire avait très tôt appris à se servir des capacités de simulation de l'ordinateur. Dans les années 1960, Murray Eden, par exemple, a donné un certain nombre de résultats approchés en combinatoire qui ne lui auraient pas été suggérés sans le recours à des simulations Monte-Carlo sur ordinateur.

4- Objection :

On pourrait objecter à cela que l'on n'a toujours affaire qu'à des explorations de concepts – explorations certes non compressibles par des algorithmes -, mais non pas à des explorations de la réalité elle-même. Cette « aventure » reste une interrogation des productions de l'esprit par l'esprit, non une interrogation des réalités du monde. D'ailleurs les simulations sont le plus souvent non réalistes. Elle repose très souvent sur des modèles mathématiques. Et chacun sait bien qu'un modèle a pour fonction de simplifier, styliser, esquisser la réalité. Donc les simulations ne sont que des caricatures formelles de la réalité.

5- Réponse :

Nous répondrions à cette objection que, comme l'a montré récemment l'historien des sciences Peter Galison (1997), l'histoire de la simulation numérique sur ordinateur a d'abord été celle d'une tentative de réplique du réel. Dès le départ, c'est dans une perspective réaliste – toutes proportions gardées - que Von Neumann et Ulam interprètent la simulation Monte-Carlo dans son rapport avec les neutrons réels. Ainsi les nombres tirés au hasard figurent des comportements assimilables à des comportements individuels de neutrons, malgré le fait que les neutrons réels soient en nombre bien plus importants. Von Neumann confirme son interprétation réaliste de la méthode de Monte-Carlo appliquée à la physique nucléaire quand il rappelle que la nature de la matière est probablement granulaire, en tout cas à l'échelle à laquelle il la considère. Cette approche discrétisée et aléatoire lui semble assez réaliste après coup donc valable. Bien entendu, il s'appuie avant tout sur les théorèmes qui autorisent une résolution statistique d'équations impossibles ou trop longues à résoudre analytiquement. Mais ce qui légitime selon lui l'appellation de simulation - venant des simulations analogiques sur analyseurs différentiels - tient au fait que dans le cas des simulations numériques, comme auparavant dans celui des simulations analogiques, on a affaire à un modèle qui « vit » de façon réaliste son traitement - selon l'expression que Louis Couffignal n'appliquait justement qu'aux modèles analogiques - plus qu'il ne calcule.

De la même façon, mais dans un tout autre domaine, le généticien Kimura tendra, dans les années 1960, à considérer le traitement de ses

modèles génétiques discrets comme plus réalistes que les modèles continus qu'il utilisait auparavant (Dietrich, 1996). Il utilisera la simulation numérique comme une expérience : pour réfuter des modèles continus. Cela tient là aussi au caractère granulaire de son objet d'étude, les gènes. A l'instar du neutron de la physique nucléaire, cet objet biologique peut donner facilement lieu à une approche discrétisée et aléatoire. Kimura n'hésitera pas ainsi à parler d'expériences sur ordinateur.

6- Objection :

Les statisticiens objectent d'ordinaire que cette méthode de Monte-Carlo n'est qu'un stratagème statistique donc intramathématique, donc théorique. Ils ont très vite nié sa nouveauté et l'ont rapporté aux techniques classiques d'échantillonnage (Marshall, 1954). De plus, les simulations ne peuvent être considérées comme réalistes puisqu'elles se fondent sur des modèles simplificateurs orientés en vue d'un objectif pragmatique. Les modèles sont perspectivistes : ils sont des outils simplificateurs visant un certain objectif. Ils formalisent un point de vue. Or, un point de vue sur la réalité n'est pas la réplique de la réalité. Les modèles sont des fictions et les simulations sont des récitations particulières de ces fictions.

7- Réponse :

Certes l'histoire montre que la plupart des modèles mathématiques ont été des fictions à vocation heuristique ou pragmatique ; et ce n'est pas seulement vrai des modèles concrets de Thompson et Maxwell mais également des modèles mathématiques. Mais la question que l'on doit aujourd'hui se poser est la suivante : une simulation est-elle encore un modèle au sens où on l'a entendu jusqu'à présent ? C'est-à-dire est-elle un schéma théorique ou imagé à but simplificateur et visant une condensation de l'information ? Beaucoup de philosophes des sciences contemporains ne veulent encore voir la simulation en science que comme une expression particulière d'un modèle. Or, la simulation informatique a de plus en plus cette fonction de répliquer la réalité dans sa complexité, c'est-à-dire dans ses détails. Avec les développements techniques de la puissance et du graphisme informatiques, la simulation devient de plus en plus l'occasion de reproduire des objets virtuels

prenant en considération la multiplicité des points de vue que l'on peut avoir sur eux dans la réalité, donc de produire des laboratoires virtuels. On n'a plus affaire à des perspectives réalistes mais à des objets réalistes. Dans la simulation entendue comme instrument scientifique, on dépasse le stade des seules images de synthèse. On est conduit à des objets substitutifs. Le cas de la simulation réaliste – à échelle globale – des plantes, telle qu'elle a été effectuée par l'équipe de Philippe de Reffye au CIRAD, a bien montré combien de tels logiciels de simulation pouvaient avoir plusieurs fonctions, brisant en cela le dogme perspectiviste du modélisme mathématisé. AMAP a ainsi d'abord servi pour faire de belles cartes de vœux ! Mais il a ensuite servi à des métiers aussi différents que ceux des urbanistes, des paysagistes, des agronomes, des botanistes, des forestiers ou des écophysiologistes.

La simulation a ainsi la fonction d'opérer une synthèse des connaissances, comme le suggère Paul Caseau (1996 et 2002). Le terme doit être pris ici au sens de la chimie de synthèse : elle produit des objets synthétiques. Elle ne conduit donc pas à une analyse des connaissances ni seulement à une instanciation d'un modèle mathématique censé garder en lui des profondeurs inexplorées. La simulation orientée objet par exemple, en s'appuyant sur la programmation du même nom, indique bien et sans ambiguïté l'importance de cette « réification » des concepts formels, de sorte que l'on peut parler à bon droit d'expériences virtuelles.

8- Objection :

Certains professionnels de la simulation peuvent encore objecter à cela que la simulation reste fondamentalement un discours, un langage, qu'elle demeure donc de la nature d'un modèle, qu'elle reste conceptuelle, même si elle donne lieu, sous ses formes graphiques à certaines présentations suggestives et sensibles de l'abstrait. Même sous forme d'images de synthèse ou de mondes virtuels, la simulation ne donnerait donc lieu qu'à une extension de notre langage et de notre écriture. Elle serait une néo-écriture qu'il faudrait apprendre à développer, à décrypter, à utiliser et à maîtriser, de peur que, dans nos vies, et dans une immense schizophrénie collective, le virtuel ne prenne finalement le pas sur le réel.

9- Réponse :

Voilà précisément où nous voulions en venir après tous ces brefs rappels concernant l'état actuel du débat et des arguments : nous récusons l'idée que la simulation ne soit qu'un langage, sauf bien sûr à revenir aux excès du structuralisme de Roland Barthes pour qui tout était langage. On se condamne à ne pas comprendre le rôle que joue la simulation dans les sciences, au titre d'instrument scientifique à part entière, si on ne la conçoit que comme un discours, une écriture ou un langage. La simulation n'est pas un langage car ses signes en sont hétérogènes : cela veut dire que la simulation utilise de plus en plus différents formalismes mathématiques qu'elle fait coexister d'une façon non mathématique, c'est-à-dire non réductible à une axiomatique commune. La simulation n'est pas un discours ni un langage non seulement parce qu'elle ne peut pas être résumée en fait mais aussi et surtout parce qu'elle ne peut pas être résumée ni donc pensée en droit à cause de l'hétérogénéité de ses outils conceptuels. L'apport de la simulation n'est pas seulement dû aux limites pratiques ou théoriques de la calculabilité de certains problèmes mathématiques. Il est également dû au fait que l'infrastructure informatique autorise que se côtoient des formalismes tout à fait hétéroclites, c'est-à-dire non réductibles les uns aux autres et non justiciables d'une même axiomatique. Ce qu'il faut comprendre, c'est que *la simulation utilise tout autrement les mathématiques que les modèles*. Elle objective des concepts formels et les fait coexister à l'intérieur d'un ou de plusieurs autres formalismes. La simulation donne lieu à l'histoire d'un écosystème rempli d'êtres mathématiques composites et hétéroclites. Elle déploie une trajectoire dans la dynamique singulière de cet écosystème, sans que cette trajectoire soit à première vue simplifiable en celle d'un système dynamique correctement formalisé et mathématisé. Cet écosystème est certes fait d'êtres mathématiques, mais il n'est pas mathématisable en tant que totalité. Ainsi le programme de simulation de la croissance des plantes AMAP du CIRAD fait pousser des graphes - topologie - par des processus stochastiques - lois de probabilité - dans l'espace tridimensionnel géométrique usuel - géométrie. A la différence des modèles, les simulations font donc coexister plusieurs formalismes et traitent toutes les mathématiques comme des mathématiques

descriptives et non comme des mathématiques constitutives². Les simulations procèdent donc de ce que nous pouvons appeler un *polyformalisme intrinsèque*.

Précisons encore. Qu'est-ce qui permet la promotion de cette coexistence bricolée et hétéroclite entre divers êtres mathématiques ou informatiques ? La synchronisation par le traitement pas à pas. A chaque pas du traitement, les formalismes se côtoient et communiquent. C'est même leur seule façon de s'homogénéiser entre eux : par instants successifs, par échantillonnages. Le pas à pas ne sert donc plus seulement à traiter l'incompressibilité algorithmique – cas de la simulation numérique – mais aussi et surtout l'hétérogénéité formelle des objets coexistants – cas de la simulation informatique. La simulation informatique n'est donc pas un langage parce que les signes y sont réglés par diverses axiomatiques, d'ailleurs parfois contradictoires entre elles. C'est aussi la raison pour laquelle une simulation ne peut être exprimée mathématiquement. A ce titre, elle n'a pas de grammaire, *a fortiori* pas non plus de grammaire générative – même si la simulation peut se servir ponctuellement et localement de telles grammaires comme dans le cas des L-systèmes -, *elle n'est pas un système de signes*. N'en déplaise à l'iconoclasme résiduel de nos philosophes, la simulation accepte de jouer un rôle - systématiquement méprisé dans l'épistémologie française depuis Bachelard -, celui de simples reproductions de la réalité, et ce jusque dans ses détails – à une certaine échelle bien sûr. Elle n'est donc pas une écriture à visée abstraite, mi-abstraite/mi-concrète, qui permettrait d'exprimer une capacité à formaliser dont on disposerait déjà et que l'on délèguerait ensuite à la machine. En effet elle ne peut donner lieu à une *construction mathématique des concepts* au sens de Kant.

Mais qu'entendons-nous par là ?

² Au sens où l'on peut dire que la physique théorique (quantique, relativité générale, ...), à la différence de la physique mathématique (mécanique rationnelle, théorie de la chaleur...) n'utilise pas mais est littéralement « constituée » de mathématiques, qu'elle leur est donc consubstantielle. Les mathématiques sont descriptives dans les simulations parce qu'elles n'ont pas d'usage théorique, c'est-à-dire qu'elles ne sont pas directement destinées à une conceptualisation. En ce sens, elles ne servent pas immédiatement à une explication.

10- Explication de l'expression « *expérience concrète du second genre* »

Nous allons d'abord ici rappeler ce que Kant entend par « construction mathématique de concept » parce que nous pensons que cela peut être éclairant si l'on veut expliciter la différence entre un discours mathématique – et donc un modèle - et une simulation informatique. Il ne s'agit pas pour nous de revenir à Kant en affirmant qu'il existe un sujet transcendantal anhistorique et des catégories de la connaissance atemporelles. L'emprunt que nous lui ferons ne nous imposera nullement de telles adhésions doctrinales. Nous ferons simplement l'essai de quelques uns de ses concepts afin d'explorer ce que l'on peut en conserver aujourd'hui, sans prétendre reconstruire pour autant une épistémologie générale, ce qui devra nécessairement exiger bien d'autres reprises, et à un niveau plus fondamental, bien entendu.

Rappelons que l'objectif de Kant est d'expliquer l'entrelacement des mathématiques avec les phénomènes sensibles. Devant les succès de Newton, il lui apparaît que certains résultats mathématiques *a priori* - avant l'expérience sensible - correspondent à une description juste de ce qui se produit dans les phénomènes sensibles. La mécanique peut donc, selon Kant, être construite en grande partie *a priori*. Kant explique ce fait remarquable par une doctrine de la bipolarité de toute connaissance scientifique : connaître implique que l'on dispose à la fois d'un concept - une « représentation générale commune à plusieurs objets » - et d'une intuition sensible - une « représentation singulière dépendant immédiatement de la présence de l'objet » - qui vienne remplir ce concept, c'est-à-dire lui donner sa signification intuitive. Pour opérer la médiation entre les deux, c'est-à-dire pour les lier et former ainsi une connaissance conceptuelle adaptée à un objet, il y a deux façons de procéder : soit de façon empirique, soit de façon *a priori*. La mécanique de Newton peut procéder en grande partie *a priori* car notre esprit peut produire ses connaissances spontanément grâce au recours à sa faculté de développer des intuitions sensibles purement *a priori*, comme c'est le cas par exemple avec l'espace imaginé, lorsque nous résolvons en pensée un problème de géométrie pure. Or cette intuition imaginaire *a priori* se trouve présider également à la manifestation des phénomènes sensibles, à notre sensibilité et à nos perceptions des phénomènes réels. La grille de lecture à travers laquelle nous lisons les phénomènes réels est donc celle même qui nous sert à les imaginer *a priori*. Tel est le

postulat majeur du kantisme que Kant présente pour sa part comme un résultat de son analyse. C'est pourquoi nous pouvons connaître certaines lois des phénomènes mécaniques totalement *a priori*, presque en fermant les yeux. C'est pourquoi il y a une physique mathématique adéquate qui permet de prédire le monde physique.

Or, et c'est d'abord cela qui nous intéresse, cette connaissance construite *a priori* repose sur la présence d'une règle permettant de commander à notre imagination la manière de remplir *a priori* ce concept - ex : le concept du principe de l'action et de la réaction, 3^{ème} loi *a priori* de la mécanique selon Kant. Cette règle est ce que Kant appelle un *schème*. Le schème du concept d'un nombre, par exemple, est la représentation de la règle réursive que l'imagination - ou intuition *a priori* - doit suivre pour le construire *a priori* et en remplir intuitivement le concept.

Qu'en est-il pour la simulation informatique ? A-t-on affaire à la construction mathématique - donc *a priori* - d'un concept ? Face au résultat d'une simulation informatique, nous n'avons pas immédiatement de concept mais nous avons une intuition au sens de « donation sensible » - s'il s'agit d'images ou d'objets virtuels - ou même, si l'on préfère, une intuition seulement au sens de « donation d'un objet singulier » - selon le sens étendu que Jaakko Hintikka (1980) donne à l'intuition kantienne. Il n'est en effet même pas besoin de dire que le résultat d'une simulation est effectivement sensible, visible, palpable, pour dire que c'est une intuition au sens de Kant. Selon Hintikka, que nous suivons ici, la doctrine de Kant n'impose pas intrinsèquement que l'intuition humaine ne soit que sensible : elle laisse ouverte la possibilité d'une intuition étendue sans qu'elle en devienne pour autant intellectuelle. Il suffit dès lors de préciser que par le terme d' « intuition », on entend toute forme de donation à l'esprit d'une entité singulière, de quelque chose donc qui se donne d'emblée comme un apax. Cela nous semble bien être le cas de tout résultat de simulation. Or, de cette intuition, nous n'avons pas de concept - donc pas de connaissance théorique - car nous n'avons pas de schème pour appliquer un concept sur le matériau empirique divers qui nous est donné par la simulation. C'est-à-dire que nous ne disposons pas de la règle qui permet de subsumer - rassembler en généralisant - sous un concept le divers de cette intuition élargie donnée par la simulation. Et cela nous le savons de façon certaine car les axiomatiques utilisées sont formellement irréductibles voire contradictoires, donc non co-

conceptualisables. Ce dont nous avons l'intuition est donc ici par nature ce qui est inconceptualisable ou inconcevable *a priori* – c'est-à-dire au moyen des seuls formalismes dont on dispose à l'heure où l'on a recours à cette simulation précise. En conséquence, il n'y a pas de représentation *a priori* dans notre intuition qui nous permettrait de prédire ce que donnera une simulation. C'est pourquoi l'on peut dire que la simulation ne donne pas lieu à une construction mathématique *a priori*. Si la simulation nous donne quelque chose de conceptuel en sortie, ce ne peut donc être un concept *a priori*, mais seulement un concept empirique.

Les connaisseurs de la doctrine kantienne pourraient précisément nous objecter ici que la façon générale de procéder propre aux schèmes - le « schème transcendantal » - est temporelle et qu'elle est parfois de ce fait échantillonnante comme peut l'être une simulation. En effet, cela est vrai du fait même que le déploiement d'un schème est toujours lié au temps - tout schème se ramène à une détermination particulière de l'intuition temporelle, l'intuition du temps - et se produit parfois pas à pas, notamment dans la construction de tous les concepts des nombres par exemple - idée géniale de Kant. Nous répondrions qu'il faut pourtant, selon Kant, que la règle précise - le schème - de l'imagination transcendantale demeure *identique* au cours de la synthèse pas à pas qui se produit par elle, ce qui n'est essentiellement pas le cas de la simulation informatique, comme nous l'avons dit, même si effectivement elle est construite pas à pas, à l'instar de certains concepts *a priori* disposant d'un schème.

En résumé, il n'y a pas de concept *a priori* qui nous permettrait d'anticiper le résultat d'une simulation parce que nous ne disposons pas de règle – ou schème - permettant de le construire sous une forme théorique dans l'intuition. *La simulation n'est pas d'ordre théorique en ce sens précis qu'elle n'est pas un système formel permettant de faire se dévider par avance un certain nombre de résultats homogènes entre eux à partir d'une seule axiomatique. Elle est une utilisation physique des mathématiques.*

Dès lors, pouvons-nous dire que la simulation donne lieu à un concept empirique ? Selon Kant, le concept empirique, comme nous l'avons dit précédemment, constitue la deuxième forme possible de remplissage d'un concept par une intuition : une intuition empirique ou *a posteriori*. On a vu qu'une simulation se donne comme une

intuition comportant du divers intuitif - présenté comme un écosystème complexe et singulier – que l'on a du mal à embrasser d'un seul coup d'œil de l'esprit. Or, s'agit-il ici de la même intuition que celle des mathématiciens ? Le mathématicien Georges Bouligand avait déjà thématiqué l'idée que l'intuition mathématique allait désormais bien au-delà du cadre étroit dans lequel Kant l'avait enserrée. C'est pourquoi il parlait d'intuition prolongée. On connaît par ailleurs la fécondité et la finesse des débats qui ont tourné autour de l'intuitionnisme mathématique au début du 20^{ème} siècle (Largeault, 1992). Si Kant faisait se coïncider les deux - intuition sensible et intuition mathématique *a priori* -, ne nous faudrait-il pas aujourd'hui et en revanche parler d'une « intuition élargie » d'un autre type que celle que nous propose les mathématiques contemporaines ? Si tel n'était pas le cas, on devrait toujours considérer que la simulation est une forme particulière de construction valable d'objets mathématiques, dans une perspective constructiviste. La simulation serait théorique car de nature purement mathématique. Il suffirait alors de reprendre la doctrine kantienne en élargissant les cadres de son intuition *a priori*, en en niant le caractère transcendantal et anhistorique, cela afin d'intégrer la simulation dans l'histoire des mathématiques. Cela ne nous semble pas être le cas. L'intuitionnisme mathématique de Brouwer visait un mode de construction, supposé le plus valable, des objets mathématiques pris un à un, dans leur spécificité axiomatique et générique. C'était encore une thèse qui visait le règlement de la question de la validité des démonstrations dans un cadre mathématique homogène. Mais elle ne visait pas du tout à régler la question de l'imbrication et de la coexistence hétéroclite de divers objets mathématiques à axiomatiques irréductibles. La simulation nous met ainsi en face de l'expérience d'une coexistence dynamique entre des formalismes traités comme des objets et communiquant comme tels. *La simulation est une écologie de formalismes objectivés*. Elle est le plus souvent irréductible à une approche de type constructiviste et mathématique. De là provient son caractère empirique. Il nous reste maintenant à justifier son caractère concret.

Le concept empirique est celui qui est rempli *a posteriori* à l'occasion d'expériences et cela grâce à l'usage de l'intuition empirique. Son usage est principalement descriptif, comme dans la chimie de l'époque de Kant (Lequan, 2000), mais ne peut être explicatif, sauf si, par la suite, on parvient à le fonder sur des concepts *a priori*. Nous

pouvons dire que dans notre intuition élargie par simulation, une telle connaissance empirique descriptive est acquise par concept empirique au sujet de ce *monde polyformalisé*. C'est un monde qui souffre d'incohérence mais pas d'un manque de cohésion. Plus précisément, les formalismes objectivés adhèrent les uns aux autres d'une façon telle que le résultat d'une simulation est compliqué et très intégré : la simulation fait tenir et croître ensemble ces formalismes objectivés. Le terme concret vient du latin *concreasco* - « croître ensemble ». Nous dirions donc qu'être concret – *concretus* – ne nécessite pas nécessairement la matérialité ni même le fait d'être sensible. C'est une qualité qui provient du fait que cette co-existence et cette co-croissance intégratrices participent de la constitution d'un objet qui ne devient dès lors accessible que par l'expérience. La compacité réaliste du *concret* se retrouve dans beaucoup de simulations qu'il faudrait donc concevoir comme des *expériences concrètes du second genre*, le premier genre concernant ici les expériences concrètes réelles, seul type d'expérience concrète que nous connaissions jusqu'à l'avènement de la simulation.

Conclusion

Nous terminerons en rappelant donc que, du fait de son *polyformalisme intrinsèque* - probabilités, géométrie, graphes, topologie, analyse, encapsulation informatique, etc. -, la simulation informatique peut valoir comme une expérience concrète du second genre, le premier genre renvoyant à l'expérience immédiate et aux expérimentations scientifiques. Des expériences virtuelles peuvent être menées qui n'interdisent nullement que des formalismes moins polymorphes leur soient progressivement substitués. Les travaux actuels d'AMAP (Nosenzo, 2001) ont par exemple remplacé par des algorithmes plus rapides certaines fonctionnalités qui étaient d'abord simulées dans la première version. Avec nos propos, nous ne voulions donc nullement affirmer que la simulation est à rechercher à tout prix : on ne doit pas renoncer à condenser le réel ou les simulations pour comprendre, c'est-à-dire qu'on ne doit bien sûr pas renoncer à produire des concepts que notre esprit pourrait déployer seul. Mais nous voulions préciser ce qui fait le caractère empirique d'une simulation informatique. Comme conséquence de ce que nous avons dit, la simulation n'a pas à recevoir le simple lot de consolation qu'on lui a tant de fois décerné : sa qualification vague comme outil heuristique.

Tout peut jouer un rôle heuristique ! L'important est d'essayer d'expliquer précisément *en quoi* la simulation peut entre autres remplir ce rôle.

Bibliographie

- Bedau, M. A. 1998. "Philosophical content and method of Artificial Life". *The Digital Phoenix: How computers are changing philosophy*, ed. by T. W. Binum and J.H Moor, Basil Blackwell, Oxford, 135-152.
- Blaise, F. *et al.* 1998. "Simulation of the Growth of Plants – Modeling of Metamorphosis and Spatial Interactions in the Architecture and Development of Plants". *Cyberworlds*, ed. by T.L. Kunii and A. Luciani, Springer Verlag, Tokyo, 82-109.
- Caseau, P. 1996 et 2002. « Crise ou mutation de la simulation numérique », version française d'un article publié en anglais en 1996, communication personnelle dans sa version française remaniée (en 2002), 11 pages.
- Di Paolo, E.A. *et al.* 2000. "Simulation Models as Opaque Thought Experiments". In *Artificial Life VII*, Proc. of the 7th Intern. Conf. on Artificial Life, ed. by Mark A. Bedau *et al.*, MIT Press, Cambridge, 497-506.
- Dietrich, M. R. 1996. "Monte-Carlo Experiments and the Defense of Diffusion Models in Molecular Population Genetics", *Biology and Philosophy*, vol. 11, n°3, July 1996, 339-356.
- Franc, A. 1996. « Croissance des peuplements forestiers hétérogènes : modélisation par des réseaux d'automates cellulaires. » In CNRS 1996, 319-327.
- Galison, P. 1997. *Image and Logic*, The University of Chicago Press, 689-752.
- Hartmann, S. 1995. "Simulation". *Enzyklopädie Philosophie und Wissenschaftstheorie*, vol. 3, Verlag Metzler, Stuttgart, 807-809.
- Hill, D.R.C. 1996. *Object Oriented Analysis and Simulation*, Addison-Wesley.
- Hintikka, J. 1980, 1996. *La philosophie des mathématiques chez Kant*, Paris, PUF, 1996, 311p ; 1^{ère} édition en anglais (sans lieu) : 1980.
- Humphreys, P. 1990. "Computer Simulations", in *PSA (Philosophy of Science Association) 1990*, vol. 2, 497-506.
- Kant, E. 1781, 1787. *Critique de la raison pure*, Paris, PUF-Quadrige, 150-156.
- Largeault, J. 1992. *L'intuitionnisme*. PUF, QSJ, Paris.
- Lequan, M. 2000. *La chimie selon Kant*, PUF/Philosophies, Paris, 9-23.
- McLeod, J. 1986. "Computer modeling and simulation : The changing challenge". *Simulation*, Mach 1986, 114-118.
- Marshall, A.W. 1954. "Preface". Proc. of the Symposium on Monte Carlo Methods, ed. by H.A. Meyer, Wiley & Sons, New York, v-ix.
- Nadeau, R. 1999. *Vocabulaire technique et analytique de l'épistémologie*, PUF, Paris.
- Nosenzo, R. *et al.* 2001. « Modèles mathématiques de conduite culturale ». *Modélisation des agroécosystèmes et aide à la décision*, éd. par E. Malézieux, G. Trébuil et M. Jaeger, CIRAD/INRA, Montpellier/Versailles, 145-172.
- Parrochia, D. 2000. « L'expérience dans les sciences : modèles et simulation ». *Qu'est-ce que la vie?*, UTLS, Odile Jacob, Paris, 193-203.
- Reffye (de), Ph. *et al.* 1991. "Growth units construction in trees : a stochastic approach". *Acta Biotheoretica*, 39, 325-342.
- Rohrlich, F. 1990. "Computer Simulation in the Physical Sciences", *PSA (Philosophy of Science Association) 1990*, vol. 2, 507-518.

- Stöckler, M. 2000. "On Modeling and Simulations as Instruments for the Study of Complex Systems". *Science at Century's End*, Proc. of the Pittsburgh/Konstanz Colloquium in the Philosophy of Science, 1997, Univ. of Pittsburgh Press, 355-373.
- Varenne, F. 2001. "What does a computer simulation prove ? The case of plant modeling at CIRAD (France)" *Simulation in industry*, Proc. of the 13th European Simulation Symposium, Marseille, October 2001, ed. by N. Giambiasi and C. Frydman, SCS Europe Bvba, Ghent, 549-554.
- Varenne, F. 2002. « Bachelard avec la simulation informatique : nous faut-il reconduire sa critique de l'intuition ? », colloque « Confiance raisonnée et défiance rationnelle : la surveillance intellectuelle (de soi) à partir de l'œuvre de Bachelard », Besançon, 12-13 décembre 2002, 17 pages, à paraître.
- Varenne, F. 2003. « La simulation face à la méthode des modèles », *Natures Sciences Sociétés*, 2003, vol. 11, n°1, 15 pages, à paraître.
- Wagensberg, J. 1985, 1997. *Ideas sobre la complejidad del mundo*, Barcelona, Tusquets Editores; traduction : *L'âme de la méduse*, 1997, Paris, Seuil.
- Wolfram, S. 2002. *A New Kind of Science*, Champaign, USA, Wolfram Media Inc., 2002, 39-41.

Sommaire

Evelyne Andreewsky	Principe d'imitation, lecture et interdisciplinarité	5
Filipe Borgès, Danièle Bourcier	Le juge connexioniste: de la simulation à la justification	11
Roger Cozien	Le laboratoire de Brillouin	25
Guillaume Deffuant, Frédéric Amblard, Raphael Duboz, Eric Ramat	Une démarche expérimentale pour la simulation individus-centrée	43
Alexis Drogoul, Diane Vanbergue, Thomas Meurisse	Simulation orientée agent: où sont les agents?	63
Jacques Ferber, Véronique Guerrin	Représentations et simulation: de la modélisation à la mise en situation	85
Vincent Ginot	Exploration numériques des propriétés d'un modèle	99
Jerzy Karczmarczuk	Peut-on simuler un système quantique	113
Hubert Kieken	Le rôle des modèles dans la gestion de l'environnement	141
Thomas Meurisse	L'importance des modèles dans la conception de simulations	153
Fabien Michel, Jacques Ferber	Interactions fortes et interactions faibles dans les simulation multi-agents	163
Pascale Nardone	La simulation en physique	177
Pascale Nardone, Françoise Decortis	La simulation: vers une épistémologie du dialogue interactif	181
Silvie Occelli	La simulation pour la modélisation des systèmes urbains	185
Denis Phan	Niveaux d'abstraction, transdisciplinarité et modélisation objet des interactions multi-agents sur des réseaux	201
Francis Rousseaux	Informatique et simulation	233
Serge Stinckwich	L'anticipation dans les systèmes complexes: conséquences pour la simulation	259
Mamadou K. Traoré, David R.C. Hill	Réflexions sur la Théorie de la Simulation	277
Franck Varenne	La simulation conçue comme expérience concrète	297

