



# Les auteurs

## Résumés/Abstracts

Introduction

**FRANCK VARENNE**

### ***Modèles et simulations dans l'enquête scientifique : variétés traditionnelles et mutations contemporaines***

**Franck Varenne** est maître de conférences en philosophie des sciences à l'Université de Rouen et chercheur au Gemass (UMR 8598, CNRS/Paris Sorbonne, [franck.varenne@univ-rouen.fr](mailto:franck.varenne@univ-rouen.fr)) @. Ses recherches portent sur la pratique et l'épistémologie des modèles et des simulations dans les sciences contemporaines. Il a notamment publié *Du modèle à la simulation informatique* (Vrin, 2007), *Qu'est-ce que l'informatique ?* (Vrin, 2009), *Formaliser le vivant : lois, théories, modèles ?* (Hermann, 2010), *Modéliser le social* (Dunod, 2011) et *Théorie, réalité, modèle. Épistémologie des théories et des modèles face au réalisme dans les sciences* (Éditions Matériologiques, 2012 @). Il a également publié dans de nombreuses revues, dont *Simulation, Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, *Natures sciences sociétés* et la *Revue d'histoire des sciences*. Depuis 2011, il est également membre du Comité de pilotage du RNSC (Réseau national des systèmes complexes).

---

Chapitre 1

**ALAIN FRANCK**

### ***Mathématisation et modélisation, entre histoire et diversité***

**Alain Franc** est directeur de recherche à l'Inra, dans l'unité «Biodiversité, gènes et communautés» @, à Pierroton, près de Bordeaux. Il a une formation en mathématiques et physique, et a travaillé en modélisation à base mathématique sur les écosystèmes forestiers depuis une trentaine d'années. Il s'intéresse actuellement à l'écologie évolutive, à comprendre comment les interactions qui structurent une communauté de plantes sont le fruit de l'histoire et de l'évolution.

**Résumé.** Peut-on modéliser la diversité du monde ? Ce texte propose quelques jalons pour étudier les homologies ou ruptures dans la modélisation des phénomènes naturels du monde physique ou biologique. La diversité caractérise le vivant, et il est délicat d'associer diversité et modélisation. Cette association est abordée ici via la complexité algorithmique des données. La régularité des patterns observés dans les systèmes vivants semble plus due à des régularités statistiques liées à la loi des grands nombres qu'à la répétition d'un processus universel générant à chaque fois le même pattern. Le lien entre patterns et processus est ainsi affaibli quand comparé à ce même lien en physique. En biologie, les patterns sont fruits de l'histoire,

d'une évolution. Les modélisations courantes en écologie via les conditions d'ici et maintenant, ou d'ailleurs et maintenant via les interactions, sont pour cette raison insuffisantes. En biologie, l'état présent comporte la mémoire du passé, encapsulée dans l'ADN des organismes, alors qu'en physique, cet état est en général suffisant pour prédire l'avenir, par la notion de système dynamique. Aussi, un objet de modélisation pertinent en biologie est celui de généalogie, c'est-à-dire de reconstruction de l'histoire. Cette notion d'histoire, qui est le théâtre où se façonne la diversité actuelle du monde vivant par les processus évolutifs, est l'une des ruptures entre la modélisation du monde physique et celle du monde biologique.

**Abstract.** Can world diversity be modelled ? Some landmarks are proposed here to study homologies or breakings while modeling natural phenomena in physical or living world. Diversity is life characteristics, and linking diversity and modeling is not straightforward. It is addressed here with algorithmic complexity of data sets. Observed regularities in living systems seem to be due to statistical regularities from law of large number rather than to universal processes yielding the same pattern repeatedly. The link between processes and pattern is weaker in living systems than in physical systems. In biology, a pattern is the outcome of history, of evolution. Current modeling techniques in ecology work with "here and now" conditions, or "there and now" conditions through interactions. Therefore, there are not sufficient. In biology, current state includes the memory of the past, encapsulated within DNA molecule, whereas in physics, current state usually is sufficient to predict the future with dynamical systems. Thus, a relevant purpose of modeling in biology is to build genealogies, i.e. reconstruction of history. This historical approach takes into the past as the theater where current diversity of living world has been built by evolution processes. It is one of the major breaking-point between modeling physical world and modeling living world.

---

Chapitre 2

**GIUSEPPE LONGO**

***Des sciences exactes aux phénomènes du vivant, à partir de Schrödinger: mathématiques, programme et modèles***

**Giuseppe Longo** est directeur de recherche au CNRS, Centre Cavailles (CIRPHLES), CNRS et École normale supérieure, Paris. Équipe «Complexité et information morphologiques» (CIM) @. Adjunct Professor, Graduate School of Cell and Developmental Biology, Tufts University, Boston.

**Résumé<sup>1</sup>.** Giuseppe Longo en appelle à un complet renouvellement des méthodes de formalisation du vivant. En utilisant une partie méconnue des suggestions d'Erwin Schrödinger publiées dans son fameux *Qu'est-ce que la vie ?* (1944), l'auteur rappelle, dans un premier temps, qu'à l'heure de

---

[1] Les résumés de Longo, Keller, Lassègue, Noble, Gandrillon, Mazat, Walliser donnés ici sont en fait extraits de l'introduction rédigée à l'époque par Marc Silberstein & Franck Varenne pour le numéro de la revue *Matière première* consacré en 2008 à la modélisation, la simulation et la biologie des systèmes (voir le NB de l'avant-propos).

l'expansion tous azimuts des modèles et simulations informatiques du vivant, il faut prendre conscience des limites de principe de tout codage fini et discret des formes vivantes : par là, en effet, on s'enferme dans le paradigme de la programmation et on inscrit de fait le modèle dans la classe des structures de détermination laplaciennes dont la prédictibilité est toujours assurée. Moyennant cela, les simulations informatiques associées sont douées d'une reproductibilité parfaite, certes bien commode (on peut relancer autant de fois la même simulation et on obtient toujours le même résultat), mais qui sur ce point les éloignent des vivants qu'elles prétendent modéliser. Simulation n'est donc pas modèle, c'est-à-dire n'est pas structure de détermination causale. À la suite de ces différentes considérations, l'auteur évoque la position qui est la sienne, et telle qu'elle intervient dans le travail commun qu'il mène depuis quelques années avec le physicien Francis Bailly : il s'agit de prendre à bras-le-corps les métaphores du changement de phase et des états critiques empruntées par la biologie des formes à la physique et de travailler à l'étude de formalismes plus généraux, plus souples et convenant à la prise en compte d'une criticité étendue. En physique, les transitions critiques sont ponctuelles. L'hypothèse théorique consiste ici à supposer que les êtres vivants sont de façon permanente en transition critique et, pour cela, reconstruisent constamment leur organisation. Il faut alors représenter autrement le temps et l'organisation. Le grand intérêt de cette suggestion audacieuse est qu'elle ne reste pas dans les chemins si parcourus de la biologie mathématique mais propose un type de renouvellement radical des mathématiques comme des observables pertinents.

---

### Chapitre 3

**EVELYN FOX KELLER**

#### ***Biologie des systèmes et recherche des lois générales***

**Evelyn Fox Keller** est physicienne de formation et s'orienta également vers la biologie moléculaire. Elle est professeur émérite d'histoire et philosophie des sciences au Massachusetts Institute of Technology (MIT) @. Elle est également connue pour son implication dans le mouvement féministe. Parmi ses livres, on trouve *The Century of the Gene*, Harvard University Press, 2000 ; *Making Sense of Life : Explaining Biological Development with Models, Metaphors, and Machines*, Harvard University Press, 2002 ; *The Mirage of a Space between Nature and Nurture*, Duke University Press, 2010.

**Résumé.** Evelyn Fox Keller met explicitement en scène une question cruciale que semble devoir se poser tout modélisateur à l'heure où l'on voit poindre de nouveaux projets de biologie des systèmes : « Quand, dans quelles circonstances et à quelles fins est-il utile de traiter un système sous sa forme la plus simplifiée, la plus idéalisée, et quand cela n'est-il pas souhaitable ? [...] Quand est-il utile de simplifier, de généraliser, de rechercher des principes d'unification, et quand n'est-ce pas le cas ? » Sa contribution met en lumière – par contraste – les différentes dimensions du vivant qui résistent durablement aux tentatives de formalisation. C'est l'occasion pour Keller d'exprimer ses doutes sur la transposabilité des notions et des traitements formels de la complexité en usage en physique (théorie des systèmes dynamiques, notions

associées d'émergence) aux formes biologiques de complexité. L'auteur reconnaît cependant que la biologie est à la croisée des chemins : il lui faut effectivement de nouvelles méthodes, sans doute héritées elles aussi d'autres disciplines. Mais bien malin qui pourrait dire d'où elles devraient impérativement venir. D'après Keller, des signes existent cependant et montrent déjà qu'une «biologie des systèmes pragmatique» avance des méthodes (modélisation *bottom-up* ou *middle-out*) et des notions (comme celle de robustesse) plus pertinentes que celle de généralité, d'universalité, d'unité, de lois ou d'«intuitions ordinaires» et directes issues des procédés mathématiques ordinairement issus de la physique.

---

#### Chapitre 4

**Jean Lassègue**

#### **Turing, entre le formel de Hilbert et la forme de Goethe**

**Jean Lassègue** est chercheur au CNRS (UMR 8178 Institut Marcel Mauss). Philosophe des sciences, il s'est tout d'abord attaché à décrire la cohérence interne de l'ensemble des travaux de Turing qui l'ont progressivement conduit de l'étude du langage formel à celle des formes biologiques.

**Résumé.** Jean Lassègue expose notamment l'apport crucial de Turing à la question de la calculabilité du modèle, et comment se dessine dans son œuvre les considérations mathématiques quant à l'exécution d'un algorithme, d'un moteur d'inférences si l'on peut dire, ou encore, dans la perspective qui nous occupe principalement ici, quant à la mise en œuvre formelle de l'objet mathématique qu'est tout modèle formel, ainsi que de ses propriétés mathématiques intrinsèques, quand, notamment, il s'agit de statuer sur les rapports du calculatoire, du calculable et du non-calculable (Turing démontrant, en 1936, «le caractère inaccessible du point de vue du calcul d'un certain nombre de problèmes exprimables pourtant sous forme calculatoire»). La modélisation, pour se déployer pleinement, doit devenir une «mécanique du calcul», via les outils de l'informatique, dont le prototype maximal et universel se trouve être la machine de Turing. Si, dans la perspective massivement informatique des sciences de la deuxième moitié du XX<sup>e</sup> siècle, l'ordinateur (*computer*, calculateur) est l'opérateur prépondérant de l'effectuation des grandes étapes de l'activité scientifique (exhiber des phénomènes, les simuler, les modéliser, etc.), ce retour à Turing est d'un grand intérêt, pour montrer, du point de vue de l'histoire des idées, le basculement dans un agir scientifique ainsi conformé par les usages intensifs des moyens mécaniques (au sens général du terme) de calcul.

---

#### Chapitre 5

**ISABELLE PESCHARD**

#### **Les simulations sont-elles de réels substituts de l'expérience ?**

**Isabelle Peschard** a obtenu un doctorat en mécanique des fluides de l'Université d'Aix-Marseille et un doctorat en philosophie des sciences, en 2004, de l'École polytechnique, Paris. Elle enseigne actuellement la philosophie des sciences à l'Université d'État de San Francisco (SFSU). Ses travaux

de recherche portent notamment sur la construction de modèles mathématiques et l'articulation entre modélisation et expérimentation @.

**Résumé.** Il n'est pas rare que la simulation numérique soit qualifiée de substitut épistémique de l'expérience. Deux arguments supportant l'idée que la simulation peut servir de substitut épistémique de l'expérience au sens fort d'équivalents épistémiques seront examinés. La thèse qui sera développée en réaction à ces arguments est qu'aussi convaincants qu'ils puissent paraître, ils sont bâtis sur une conception erronée de l'expérience et que, loin d'être équivalentes les fonctions épistémiques de la simulation et l'expérience ne sont pas les mêmes car ces activités ne produisent pas le même type d'information. Si c'est le cas, plutôt que de comparer leurs pouvoirs épistémiques, ce qui est requis est de clarifier et préciser les différences et modes de coopérations épistémiques entre ces deux types d'activité.

**Abstract.** Computer simulations are sometimes said to be epistemic substitutes for experimentation. This paper will examine two arguments that seem to support the idea that a computer simulation can be an epistemic substitute for experimentation in the sense of being epistemic equivalent. The thesis that will be developed, in reaction to these arguments, is that, as convincing as they may seem, they are grounded on a mistaken conception of experimentation and that, far from being equivalent, the epistemic functions of simulation and experimentation are not the same. They are not the same because they are simply not producing the same kind of information. And if that is the case, then, what is required, instead of comparing their epistemic powers, is to clarify and specify the differences and forms of cooperation between these two types of activity.

---

## Chapitre 6

**JULIE JEBEILE**

### ***Le tournant computationnel dans les sciences : la fin d'une philosophie de la connaissance***

**Julie Jebeile** réalise une thèse de doctorat à l'IHPST (Institut d'histoire et de philosophie des sciences et des techniques) sur la compréhension scientifique dans les sciences empiriques @. Elle s'interroge en particulier sur le rôle explicatif des modèles qui sont utilisés à la fois comme représentations de systèmes naturels ou sociaux et comme outils inférentiels. Dans ses travaux, elle cherche notamment à évaluer l'éventuelle dégradation ou amélioration de la compréhension induite par le tournant computationnel des sciences, c'est-à-dire par l'utilisation de l'ordinateur dans l'activité de modélisation.

**Résumé.** Dans ce chapitre, je défends l'idée que la philosophie de la connaissance actuelle, telle qu'elle s'applique aux modèles classiques, se révèle être inopérante dans le cas particulier des simulations numériques. À cette fin, je recense dans un premier temps les procédures d'une justification dite « traditionnelle » des modèles classiques. Dans un second temps, je montre tour à tour qu'aucune de ces procédures ne s'applique véritablement aux modèles de simulations. Leurs limites révèlent l'insuffisance

de la philosophie de la connaissance actuelle et par conséquent l'urgence d'une épistémologie mieux adaptée.

**Abstract.** In this chapter, I argue that the current epistemology, as it applies to classical models, proves to be inefficient in the particular case of computer simulations. For this purpose, I first identify the procedures of a "traditional" justification of classical scientific models. Then, I show that each of the identified procedures fails to apply to simulation models. Their limits reveal the inadequacy of the current epistemology, and therefore the urgent need for a more adequate epistemology.

---

## Chapitre 7

**SÉBASTIEN DUTREUIL**

### **Comment le modèle Daisyworld peut-il contribuer à l'hypothèse Gaïa ?**

**Sébastien Dutreuil.** Formé en sciences de la Terre (licence, agrégation), en biologie (master) et en philosophie des sciences (master), il est actuellement en thèse à l'Université Paris 1 et à l'IHPST sous la direction de Jean Gayon et Philippe Huneman. Il y effectue un travail d'histoire et de philosophie des sciences sur l'hypothèse Gaïa. Il cherche à clarifier cette hypothèse et analyse le rôle de l'analogie de la Terre à un organisme ainsi que le rôle que jouent les modèles.

**Résumé.** Le modèle *Daisyworld* décrit une planète imaginaire sur laquelle une régulation de la température émerge grâce au couplage fort entre la vie et son environnement. Cette simulation numérique était initialement construite pour répondre à une critique théorique visant l'hypothèse Gaïa (HG). En précisant la portée épistémique de *Daisyworld* et la nature des critiques adressées à HG puis à *Daisyworld* nous examinons sous quelles conditions un tel modèle peut contribuer positivement au débat théorique qui l'a fait naître. Nous montrons que certains résultats sont robustes, originaux, et pertinents pour HG.

**Abstract.** The *Daisyworld* model describes an imaginary planet on which a regulation of the temperature emerges out of a strong coupling between life and its environment. This numerical simulation was initially created to answer to a theoretical critique addressed to the Gaïa hypothesis (GH). By precisising the epistemic reach of *Daisyworld* and the nature of the critiques made to GH and then to *Daisyworld* we assess under which conditions such a model can contribute to the theoretical debate that brought it to existence. We show that certain results are robust, originals and relevant for GH.

---

## Chapitre 8

**PHILIPPE HUNEMAN**

### **Émergence computationnelle, causalité et objectivité : éléments d'une approche théorique alternative**

**Philippe Huneman** est chargé de recherche à l'Institut d'histoire et de philosophie des sciences et des techniques (CNRS/Paris 1-Sorbonne), est un philosophe de la biologie travaillant surtout sur des problèmes de la biologie de l'évolution @. Intérêts majeurs: la variété des explications

évolutionnistes; la causalité en biologie; l'individualité en biologie et son évolution; le concept de l'organisme et son rôle dans la biologie actuelle – un thème lié à un travail antérieur sur la conception kantienne de la biologie rapportée aux conceptions prébiologiques de l'organisme. En plus de nombreux articles sur ces questions dans des revues spécialisées, il a écrit *Métaphysique et biologie, Kant et la constitution du concept d'organisme* (Kimé, 2008), a édité le volume *Functions: sélection and mechanisms* (Springer, 2012), et a été codirecteur des *Mondes darwiniens* (2009, nouvelle édition en 2011, Éditions Matériologiques @), et de *From groups to individuals* (MIT Press, 2012 @).

**RÉSUMÉ.** Ce chapitre propose une vision computationnelle de l'émergence comme alternative à la vision traditionnelle, appelée ici «combinatoire», entendue à partir de la différence naître le tout et les parties. L'émergence computationnelle est une propriété objective (au sens d'indépendante de nos capacités cognitives) de certains modèles de phénomènes, et donc ce concept évite l'objection de l'émergence combinatoire qui est généralement, faite, à savoir son caractère épistémique. Le chapitre montre que l'émergence computationnelle peut être caractérisée en termes de causalité, et puis indique qu'une sous-classe des processus computationnellement émergents peut satisfaire les connotations usuelles de l'usage scientifique du terme, telles que «l'ordre» et la «nouveau». Après avoir ainsi élaboré un tel concept d'émergence, je me tourne vers la question de l'application de ce concept au monde réel, et demande si de telles instantiations du concept existent.

**ABSTRACT.** This chapter presents a computational view of emergence, alternative to the usual combinatorial view, formulated in terms of parts and wholes. Computational emergence is an objective property (in the sense of "independent from our cognitive abilities) of the models of some phenomena, and thereby it avoids the objection often made to combinatorial emergence, namely its epistemic character. It show that computational emergence can be characterized in terms of causation, and that a subclass of computationally emergent process display many of the connotations of the scientific use of the term, such as "order" and "novelty". After having so captured a concept of emergence, I turn to the question of applying the concept and testing whether some instantiations exist.

---

Chapitre 9

**PIERRE-ALAIN BRAILLARD**

**Que peut expliquer un modèle complexe et peut-on le comprendre ?**

**Pierre-Alain Brillard** a une double formation en biologie et en histoire et philosophie des sciences. Après avoir achevé sa thèse à l'Université Paris 1 (IHPST), il a effectué un séjour post-doctoral à l'université de Kyoto (Japon). Il est actuellement ATER à l'Université de Lille 1, où il enseigne l'histoire et la philosophie de la biologie. Ses recherches portent sur les implications philosophiques du développement récent de la biologie des systèmes.

**Résumé.** Les modèles mathématiques et informatiques ont pris récemment une place importante en biologie. Cependant, de nombreuses questions se posent au sujet de leurs rôles explicatifs, notamment à cause de leur complexité croissante, qui fait qu'ils sont souvent difficiles à appréhender intuitivement. On peut donc se demander ce qu'ils apportent d'un point de vue cognitif aux chercheurs et de quelles manières ils font progresser notre compréhension des phénomènes biologiques. Ce chapitre veut montrer que ces modèles, en plus d'être des outils utiles pour la prédiction et l'explication (comprise dans un sens objectif), permettent la formulation de principes intelligibles. Le concept de compréhension, qui a traditionnellement été négligé en philosophie des sciences, permet de rendre compte d'une partie essentielle du développement récent de la biologie des systèmes. Le but de ces approches n'est pas seulement de représenter et analyser la complexité des réseaux de régulation, mais également le développement d'un cadre général dans lequel cette complexité pourrait devenir plus intelligible. L'intérêt d'une partie de ces modélisations est qu'elles tentent de combiner un effort vers la généralité, qui a toujours été une préoccupation majeure de la biologie théorique, avec un solide ancrage empirique, qui a justement fait défaut à celle-là.

**Abstract.** Mathematical and computational models are increasingly playing central roles in biology. However, their explanatory import is subject to debate, partly because of their growing complexity, which makes them difficult to grasp intuitively. It is thus not completely clear what they can bring to scientists from a cognitive point of view and how they contribute to our understanding of biological phenomena. This chapter shows that these models are not only useful tools for prediction and explanation (defined in an objective sense) but they also enable formulating intelligible principles. Understanding is a concept that has traditionally been neglected by philosophers of science, but it is a necessary one in order to account for recent developments in systems biology. The goal of these approaches is not only to represent and analyze regulatory networks' complexity, but also to develop a general framework in which this complexity becomes more intelligible. What is remarkable about such modelling is that it tries to combine the search for generality, which has always been a major concern of theoretical biology, with a strong empirical basis, something that has often been lacking.

---

Chapitre 10

**FRANCK VARENNE**

**Modèles et simulations: pluriformaliser, simuler, remathématiser**

**Franck Varenne** est maître de conférences en philosophie des sciences à l'Université de Rouen et chercheur au Gemass (UMR 8598, CNRS/Paris Sorbonne, [franck.varenne@univ-rouen.fr](mailto:franck.varenne@univ-rouen.fr)) @. Ses recherches portent sur la pratique et l'épistémologie des modèles et des simulations dans les sciences contemporaines. Il a notamment publié *Du modèle à la simulation informatique* (Vrin, 2007), *Qu'est-ce que l'informatique ?* (Vrin, 2009), *Formaliser le vivant: lois, théories, modèles ?* (Hermann, 2010), *Modéliser le social* (Dunod,



2011) et *Théorie, réalité, modèle. Épistémologie des théories et des modèles face au réalisme dans les sciences* (Éditions Matériologiques, 2012 ©). Il a également publié dans de nombreuses revues, dont *Simulation, Journal of Artificial Societies and Social Simulation, Natures sciences sociétés* et la *Revue d'histoire des sciences*. Depuis 2011, il est également membre du Comité de pilotage du RNSC (Réseau national des systèmes complexes).

**Résumé.** Ce chapitre montre, dans un premier temps, que l'introduction des concepts de *sous-symbolisation* et de *pluriformalisation* permet de concevoir à la fois ce qui rassemble et ce qui distingue trois des principaux types de simulation sur ordinateur : *numérique, algorithmique, informatique*. Dans un second temps, il vise à montrer qu'une séquence typique tend aujourd'hui à se mettre en place lorsqu'il s'agit de modéliser : pluriformalisation (avec des systèmes de modèles et non plus au moyen d'un modèle unique à formalisme unique), puis simulation informatique de ce système de modèles, enfin recherche de formalisme unifiant et donc *remathématisation* à l'aide de cette simulation. Ce chapitre expose pour ce faire un cas typique d'évolutions des modèles mathématiques vers des simulations, puis de ces simulations vers de nouveaux modèles mathématiques : le cas de la modélisation du développement et de la croissance des plantes. Il montre que ce sont les qualités actuelles de certaines *simulations informatiques* (1. souplesse de formalisation, 2. calibration, 3. approches multi-échelles ou multi-aspects) ainsi que leurs limitations (1. problème de robustesse, 2. maîtrise variable du support inductif qu'elle constitue comme empirie seconde, 3. intrication de différents statuts épistémiques de ces systèmes de modèles : intrication de l'explicatif, du fictif et du phénoménologique), qui à la fois *autorisent* le passage à une phase de *remathématisation* rigoureuse et en *expliquent* le besoin actuel. Il se risque à pronostiquer que ce retour au modèle mathématique effectué grâce à un travail préalable sur des simulations informatiques intégratives sera de plus en plus recherché dans les domaines à objets complexes, mais que cela ne pourra valablement se faire qu'à condition précisément que les qualités déjà citées et propres à certaines simulations, soient présentes et explicitées.

**Abstract.** The first aim of this paper is to show that the concepts of *subsymboldhood* and *pluriformalization* enable to explain the similarities and differences between three distinct types of computer simulations : numerical simulations, rule-based simulations and software-based simulations. The second aim is to explain why, in the contemporary processes of modeling, we more and more see a new and typical succession of steps : pluriformalization (a plurality of formalisms coexisting in a system of models and not in a unique model) often comes first, then a computer simulation of this system of models (most of the time a software-based one) and finally the *remathematization* of this pluriformalized system thanks to the manipulation and analytic study of its prior simulation. To illustrate this methodological process more concretely, the paper describes the recent evolution of the modeling and simulating practices of plant growth. This case study shows more precisely some of the technical reasons why this methodological scansion has been adopted. In particular, it shows that software-based simulations are favored,

in a first step, because of 1) the flexibility and adaptability of their formalism, 2) their ability to lead to calibrations with data, 3) their capacity to enable multiscale or multiaspectual approaches. But it shows that the final need to *remathematize* such simulations can be explained too by some of their correlative pitfalls: 1) their frequent lack of robustness, 2) the variable supervision the modeler can have on the diverse empirical data as a plausible and coherent foundation for reasoned inductions, 3) the multiplicity and entanglement of the epistemic statuses of models in such pluriformalized systems of models. Nevertheless, and finally, the author suggests making this forecast: the search for mathematical models thanks to the study and analysis of such prior complex computer simulations probably will spread in the coming years. But, as far as applied epistemology is concerned, it implies that we see computer simulations as they are: diverse in nature and in epistemic status, and, mostly, as not always reducible to an approximate resolution of a uniform mathematical model.

---

Chapitre 11

**HUGUES BERRY & GUILLAUME BESLON**

***De la modélisation comme poésie. La modélisation de systèmes biologiques complexes vue par deux modélisateurs***

**Hugues Berry** est chercheur à l'Inria (Institut national de recherche en informatique et automatique) à Lyon. Il a obtenu un doctorat en biochimie/biophysique de l'Université de technologie de Compiègne en 1999, puis fut maître de conférences au sein du département Biologie de l'Université de Cergy-Pontoise de 2000 à 2004. En 2004, son activité de modélisation et de simulation numérique l'amena à rejoindre l'Inria, d'abord au sein de l'équipe-projet Alchemy à Osay (où il a contribué à un projet d'informatique bio-inspirée) puis, depuis 2009, dans l'équipe-projet Beagle @ sur la modélisation en biologie cellulaire et évolution. Ses thématiques de recherche concernent la biologie cellulaire computationnelle et les neurosciences computationnelles. Plus spécifiquement, il s'intéresse actuellement à l'influence de l'espace et l'encombrement macromoléculaire sur la signalisation et la biochimie intracellulaire, et aux réseaux moléculaires impliqués dans la plasticité neuronale et les interactions entre cellules gliales et neurones.

**Guillaume Beslon** est professeur des universités à l'Insa de Lyon @. Après un parcours relativement classique en informatique (ingénieur puis docteur en informatique, maître de conférences puis professeur au département informatique de l'Insa de Lyon), il s'est spécialisé sur les interactions entre sciences de l'information et sciences de la nature, et mène depuis une dizaine d'années des recherches sur la modélisation individu-centrée de systèmes biologiques complexes, en particulier par des approches d'évolution expérimentale *in silico* et de modélisation individu-centrées de systèmes cellulaires. Cette spécialisation l'a amené à rejoindre l'Institut Rhône-Alpin des systèmes complexes qu'il a dirigé de 2009 à 2011 (il en est actuellement directeur adjoint) et à s'intéresser à toutes les formes d'interdisciplinarités, y compris les interactions art-science-société. Depuis 2011, il dirige l'équipe Inria

Beagle où sont menés des travaux de modélisation en évolution artificielle et en biologie computationnelle.

**Résumé.** La question du statut et de l'usage des modèles en sciences est récurrente mais curieusement, elle n'est que relativement peu abordée par les modélisateurs eux-mêmes. Ceux-ci sont pourtant les premiers concernés par le statut de cet «outil», surtout lorsqu'ils l'utilisent pour interagir avec d'autres disciplines scientifiques. Dans ce chapitre, nous, modélisateurs exploitant des modèles individu-centrés pour produire des connaissances en biologie, portons un regard sur notre propre pratique de la modélisation. Cela nous conduit à considérer nos modèles comme des instruments scientifiques et, partant, à proposer un usage des modèles adapté à ce statut. Nous en déduisons plusieurs contraintes sur l'usage des modèles que nous déclinons sous la forme de règles de bonne conduite pour le modélisateur. En particulier, de même que tout instrument utilise des technologies issues d'une discipline pour porter un regard sur une autre, nous soutenons ici l'idée que la principale difficulté dans la pratique de la modélisation n'est pas tant le statut épistémologique des modèles que l'interdisciplinarité qui résulte naturellement de leur usage. Nous illustrons notre propos par un exemple issu de la microbiologie : le positionnement du septum de la bactérie *E. coli*, étudié ici par des mécanismes de réaction-diffusion intracellulaires. Cet exemple montre en particulier comment la production de connaissances à partir d'un modèle demande de faire appel à un ensemble d'outils issus de plusieurs disciplines, de les confronter et de les faire communiquer pour les inclure dans le modèle, le paramétrer, l'analyser et *in fine* produire la connaissance. Enfin, en conclusion, nous revenons sur la position du modélisateur dans cette boucle vertueuse qui va du modèle à son objet. Nous suggérons en particulier que le modélisateur, plus qu'être un acteur de cette boucle, en est l'incarnation.

**Abstract.** Questioning the status and usage of models in science is common practice, but, strangely, has hardly been tackled by the modelers themselves. Yet, this issue should be of prime concern to modelers, especially when they use their models to interact with other disciplinary fields. In this chapter, we, as modelers developing individual-based models in order to produce new knowledge in biology, question our own practice of modelling. This leads us to consider our models as scientific instruments, thence to propose a way to use them as a fair practice to match this status. We deduce several constraints related to the usage of models that we arrange as rules of a code of good practice for the modeler. In particular, just as any instrument borrows technologies in a given field to investigate another field, we argue that the major issue in modeling is not really the epistemological status of the models, but rather the interdisciplinarity that naturally emerges from their usage. We illustrate our points by an example in microbiology : the positioning by intracellular reaction-diffusion mechanisms, of the division septum in *E. coli*. This example shows how the production of knowledge from a model necessitate to leverage a diverse set of tools from various disciplinary fields, to confront them and have them interact in order to include them in the model before parametrizing and analyzing it and *in fine*, produce new knowledge. In conclusion, we focus on the position of the modeler within the virtuous circle

that links the model to its modeled object. We suggest in particular that the modeler is more than an actor in this circle, it actually embodies it.

---

Chapitre 12

**STÉPHANE COLOMBI**

### ***Simulations numériques des grandes structures de l'Univers***

**Stéphane Colombi** est directeur de recherche au CNRS et travaille à l'Institut d'astrophysique de Paris @ sur différents aspects statistiques, dynamiques et numériques des grandes structures de l'Univers.

**Résumé.** La distribution de matière à grande échelle dans l'Univers, observée dans les catalogues de galaxies, présente des structures remarquables telles que des amas de galaxies, des filaments et des nappes entourant de grands vides. Ce chapitre discute des méthodes numériques utilisées pour étudier l'évolution dynamique de ces grandes structures dans l'Univers en expansion. La gravitation est la force dominante à grande échelle: cela permet, en première approximation, d'étudier la dynamique des grandes structures par de «simples» simulations à N corps. À plus petite échelle, en revanche, les phénomènes entrant en jeu dans la formation des galaxies sont considérablement plus complexes: ils doivent être abordés avec des schémas de type hydrodynamique, qui décrivent de manière précise la physique du gaz baryonique. Une approche complète, mais délicate à mettre en œuvre, tient compte des effets complexes de rétroaction induits par la formation des étoiles et par les noyaux actifs de galaxies. Les simulations représentent un outil puissant en cosmologie: par exemple, elles ont permis de découvrir que les halos de matière noire suivaient un profil universel de densité. Elles sont également nécessaires pour tester les prédictions de la théorie des perturbations. Finalement, dans une ère de cosmologie de précision, elles représentent une clé de voûte de la préparation et de l'analyse de grands relevés observationnels modernes.

**Abstract.** The distribution of matter in the Universe on the largest scales, as observed in galaxy catalogs, shows remarkable structures such as galaxy clusters, filaments and sheets surrounding large voids. This chapter discusses numerical methods that can be used to study the dynamical evolution of these large-scale structures in the expanding Universe. On large scales, gravity is the dominant force: it allows one, as a first approximation, to study large-scale structure dynamics with "simple" N-body simulations. At smaller scales, on the other hand, phenomena involved in galaxy formation are considerably more complex and must be investigated with hydrodynamic schemes that describe baryonic gas physics. A complete but challenging approach must take into account feedback effects induced by star formation and active galactic nuclei. Simulations represent a uniquely powerful tool in cosmology: for example, numerical simulations demonstrated that density profiles of dark matter halos follow a universal law. They are also needed to test the predictions of perturbation theory. In our age of precision cosmology, they represent one of the cornerstones in the analysis of modern surveys of the Universe.

## Chapitre 13

**FRÉDÉRIC S. MASSET****Modélisation des interactions disque-protoplanètes**

**Frédéric Masset** est astrophysicien au Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) depuis 2001, et se trouve présentement détaché auprès de l'Université autonome nationale du Mexique. Après une thèse en dynamique galactique au CEA, il a réalisé un séjour post-doctoral au Queen Mary & Westfield College, à Londres, où il a commencé à s'intéresser à la migration planétaire. Il est l'auteur principal du code hydrodynamique public FARGO, qui a été utilisé intensivement au cours de la dernière décennie par une dizaine de groupes dans le monde travaillant sur la migration et formation planétaire. Il s'intéresse présentement aux nouvelles techniques de calcul parallèle sur GPUs (*Graphics Processing Units*) @.

**Résumé.** Les découvertes de planètes extrasolaire au cours de deux dernières décennies ont bouleversé notre vision de la formation planétaire, et ont montré le rôle crucial que peuvent jouer les interactions de marée planète-disque dans le façonnement des systèmes planétaires. Celles-ci, en particulier, engendrent ce que l'on appelle la migration planétaire, processus au cours duquel les orbites se contractent sur des temps très courts devant la durée de vie des disques protoplanétaires, progéniteurs des planètes. Afin de comprendre la formation planétaire, et être capable de prédire quel type de système planétaire va émerger d'un disque protoplanétaire donné, il faut comprendre en profondeur les mécanismes de l'interaction. Initialement ils ont été étudiés en régime linéaire par des travaux exclusivement analytiques, mais ceux-ci ont rapidement montré leurs limitations. Il a donc été nécessaire d'étudier par le biais de simulations numériques, qui ont permis d'élucider de nombreux mécanismes et de mettre en évidence de nouveaux modes de migration. Nous décrivons le principe des simulations numériques sur grille des disques protoplanétaires gazeux. Nous présentons l'évolution des méthodes de simulations dans ce domaine de l'astrophysique, depuis les grilles de modèles simplifiés permettant de comprendre la dépendance de la migration vis-à-vis des différents paramètres du disque, jusqu'aux simulations modernes orientées vers une modélisation de plus en plus réaliste des disques.

**Abstract.** The discovery of extrasolar planets during last two decades has changed deeply our understanding of planetary formation, and it has shown the foreground role played by planet-disk tidal interactions in shaping planetary systems. These interactions, in particular, trigger a radial drift of the orbit toward the star, a process known as planetary migration. Planetary migration occurs on a much shorter timescale than the lifetime of the progenitor protoplanetary disk. In order to understand planetary formation, it is necessary to get an in depth understanding of the different processes that contribute to the tidal force. They have been studied initially through analytical works in the linear regime, but those fell short of describing correctly many systems. By resorting to numerical simulations, it has been possible to elucidate several processes involved in the tidal force exerted on the

planet, and new migration modes have been unveiled. We describe in a simplified manner the principles of numerical simulations of gaseous disks on a grid. We present how the simulation strategy in the domain of planet disk tidal interactions has evolved over time, from the parameter space exploration by means of relatively lightweight calculations, toward modern simulations, that involve more complex and numerically expensive ingredients, and which are oriented toward an increasingly realistic description of protoplanetary disks.

---

## Chapitre 14

**HERVÉ WOZNIAK**

### ***Diffuser modèles et simulations en astrophysique : l'apport de l'Observatoire virtuel***

**Hervé Wozniak** est astronome @, directeur de l'Observatoire astronomique de Strasbourg, président du comité scientifique du mésocentre de calcul haute performance et porteur du projet d'équipement d'excellence Equip@Meso pour l'Université de Strasbourg. Il a présidé le Theory Interest Group de l'IVOA, participé au Theory Expert Group du projet européen EuroVO-DCA et à des prospectives nationales et européennes sur les simulations et l'Observatoire virtuel @.

**Résumé.** Depuis plus d'un demi-siècle, la simulation numérique en astrophysique a subi une mutation qui l'a amenée de l'artisanat au gigantisme. Son développement a engendré de nouvelles pratiques de recherche et de nouveaux besoins, en particulier pour comparer ses résultats avec les données issues de l'observation astronomique. Ces pratiques modernes nécessitent de conserver, organiser et rendre publics les résultats de simulations au travers du Web. Mais l'accroissement du volume et de la complexité des données générées rend difficile le simple partage de fichiers. Des services en ligne sont mis en place à l'instar de ceux qui existent depuis longtemps pour les données observationnelles. Ils sont basés sur des standards et des protocoles permettant leur interopérabilité, facilitant l'accessibilité et la sélection des simulations qui intéressent le chercheur. Cette harmonisation de l'accès aux données est réalisée dans le cadre international de l'Observatoire virtuel. La nécessité d'une description unifiée des produits de simulation numérique a ainsi donné vie au standard de l'International Virtual Observatory Alliance, le *Simulation Data Model*. Ce faisant, la genèse de ce modèle a également permis de formaliser les processus mis en œuvre pour réaliser une simulation numérique. Le travail sur la mise à disposition des données c'est alors couplé d'une réflexion épistémologique sur les pratiques de recherche en astrophysique computationnelle. Le mouvement ne s'arrête pas là : les volumes de données gigantesques et l'arrivée de nouvelles technologies questionnent à nouveau le comportement du chercheur qui souhaite accéder aux simulations en astrophysique ou les mettre en ligne. L'aventure continue...

**Abstract.** For more than half a century, computational astrophysics has undergone a mutation which led from the crafts to the gigantism. Its

development has led to new practices and new research needs, in particular to compare the results with data from astronomical observation. These modern practices need to store, curate and make public the results of simulations through the Web. But the increase in volume and complexity of generated data makes it difficult to simply share files. Online services are set up like those who have long existed for observational data. They are based on standards and protocols for interoperability, and facilitate the accessibility and selection of simulations that interest the researcher. This harmonization of data access is done through the International Virtual Observatory. The need for a unified description of simulation products has given life to a standard of the International Virtual Observatory Alliance, the *Simulation Data Model*. In doing so, the genesis of this model was also used to formalize the processes used to produce a numerical simulation. The work on data online publishing is then coupled to an epistemological thought on research practices in computational astrophysics. The movement does not stop there: the huge data volumes and the introduction of new technologies again question the behaviour of the researcher who wishes to access the simulations in astrophysics or put them online. The adventure continues...

---

Chapitre 15

**ÉDITH PERRIER**

***Modèles et simulations multi-échelles de systèmes complexes sol-eau***

**Édith Perrier.** Habilitée à diriger des recherches à l'UPMC (Université Pierre et Marie Curie), est actuellement directrice de recherche émérite à l'IRD (Institut de recherche pour le développement) @. Elle est chercheuse au sein de l'unité mixte internationale IRD-UPMC Ummisco (Modélisation mathématique et informatique des systèmes complexes). Elle est aussi la directrice du RNSC (Réseau national des systèmes complexes), un GIS multi-organismes de recherche français et éditeur en chef de la section physique du sol de la revue *Geoderma* (Elsevier). Mathématicienne de formation, elle a conduit des recherches en modélisation informatique dans de nombreux domaines d'application, et tout particulièrement sur la recherche de liens déterministes entre l'organisation structurale des sols et leurs propriétés de fonctionnement hydrodynamique. Sa liste de publications est en ligne @.

**Résumé.** C'est en partant de son expérience personnelle de recherche sur le fonctionnement hydrodynamique des sols que l'auteur propose ici un état de l'art général, mais non exhaustif, de plusieurs approches de modélisation et de simulation à différentes échelles du système sol-eau. La première partie de ce chapitre décrit les équations de base en mécanique des fluides dans les milieux poreux, de Navier-Stokes à Darcy. On y présente aussi des méthodes alternatives de simulation discrète comme les automates cellulaires des «gaz sur réseaux». La deuxième partie traite de la recherche de liens entre caractéristiques structurales et caractéristiques hydrodynamiques des sols, à partir d'approches statistiques ou déterministes, d'analyse d'images ou de modèles utilisés en méthode inverse. L'auteur attribue une large place à ses propres travaux conduits dans ce cadre : il s'agit de construire des modèles fractals de la structure

géométrique des sols, afin de rechercher des lois d'échelle raisonnées pour expliquer les corrélations observées entre la distribution de taille des vides (ou pores) des sols et leur fonctionnement en termes de rétention et de transfert d'eau. La troisième partie focalise sur les méthodes de simulation des structures conductrices comme des graphes d'objets élémentaires interconnectés: il s'agit soit de calculer la perméabilité de réseaux de pores par analogie avec un circuit de résistances électriques, soit de s'inspirer de la théorie de la percolation, établie au départ par les physiciens pour des milieux binaires aléatoires quelconques, pour estimer des probabilités d'existence de chemins conducteurs dans des réseaux modèles de type fractal. L'ensemble du chapitre comme sa conclusion est l'occasion d'une dissertation sur la modélisation mathématique ou informatique de systèmes naturels multi-échelles, dont la quantification structurale et fonctionnelle pose des défis comparables à ceux rencontrés dans la modélisation de nombreux autres systèmes complexes inertes ou vivants.

**Abstract.** This chapter presents a rather general but non exhaustive review of several modelling and simulation approaches used at different scales of the water-soil system, and based on the author's personal background in the field of soil hydrodynamics research. The first section describes the basic equations which rule fluid dynamics in porous media, including Navier-Stokes and Darcy laws, and also alternative discrete simulating methods such as the "lattice gas" automata. The second section deals with the search for links between the soil structural and hydraulic properties, from a statistical or deterministic point of view, using direct image analysis or indirect estimation of some flow models parameters. The author puts the emphasis on her own research work in this context, modelling soil structure through fractal geometry: the goal is to find argued scaling laws explaining the observed correlations between the soil pore (void) size distribution and its behaviour as regards water retention and transfer. The third section focuses on network modelling methods, where the water conducting soil is modelled as a graph of interconnected elementary conducting objects. It is shown how the permeability can be derived in pore networks from electrical analogy and how the connectivity of potential water paths can be estimated on fractal networks from methods inspired by the percolation theory, first established by physicists on any random binary medium. The whole chapter gives the opportunity to discourse more generally about the mathematical and computer modelling of multiscale natural systems, whose both structural and functional quantification remains a challenge as for many other living or inert complex systems.

---

Chapitre 16

**HERVÉ DOUVILLE**

***Évolution récente des modèles numériques de climat***

**Hervé Douville** est ingénieur en chef des Ponts, des eaux et des forêts, diplômé de l'École nationale de la météorologie et de l'Institut national agronomique Paris-Grignon. Il est titulaire d'une thèse de l'Université Paul Sabatier et d'une habilitation à diriger des recherches de l'Institut national



polytechnique de Toulouse. Depuis 1995, il est chercheur au Centre national de recherches météorologiques (Toulouse) où il dirige l'équipe Variabilité-détection-rétroactions au sein du groupe Climat @. Il est l'auteur ou le coauteur de près d'une centaine d'articles, la plupart dans des revues à comité de lecture.

**Résumé.** Les modèles numériques de l'atmosphère et de l'océan se sont imposés en quelques décennies comme des outils indispensables à la compréhension du climat et de son évolution à plus ou moins long terme. Au-delà des prévisions saisonnières, aujourd'hui réalisées en temps réel grâce au développement de calculateurs toujours plus puissants, la communauté scientifique organise à intervalles réguliers un exercice international d'intercomparaison visant à fournir des scénarios climatiques du XXI<sup>e</sup> siècle et à en comprendre les incertitudes. Sur ces deux fronts, les progrès obtenus depuis les années 1990 sont réels mais insuffisants au regard des enjeux socio-économiques et géopolitiques. Les modélisateurs du climat sont donc amenés à réfléchir sur leurs pratiques et sur les stratégies à suivre pour fournir des informations plus fiables et plus précises, qui puissent servir de support objectif à la prise de décision. Au-delà d'une brève histoire de l'évolution récente des modèles de climat, ce chapitre se veut l'écho des questions qui rassemblent ou parfois divisent aujourd'hui la communauté scientifique et qui doivent être débattues sur la place publique.

---

Chapitre 17

**ÉRIC BRUN, SAMUEL MORIN & VINCENT VIONNET**

***La modélisation du manteau neigeux en réponse à des enjeux majeurs souvent ignorés***

**Samuel Morin** est chercheur au Centre d'études de la neige (CNRM-GAME, Grenoble) et responsable de l'équipe «Manteau neigeux» du CEN depuis 2009 @. Après une thèse en chimie isotopique de l'atmosphère soutenue en 2008 (Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement, Grenoble & Université Paris-Est), il se spécialise depuis en observation et modélisation numérique des propriétés physiques de la neige dans le contexte de la composante nivale du bilan d'énergie et de masse de la surface terrestre. **Vincent Vionnet** termine sa thèse au Centre national de recherches météorologiques (CNRM-GAME) à Toulouse @, consacrée à l'observation et à la modélisation numérique du transport de la neige par le vent en zone de montagne. **Éric Brun** a mené dans les années 1980 au Centre d'études de la neige des recherches en laboratoire, sur le terrain et en modélisation qui ont contribué au développement du modèle Crocus, décrit dans la thèse de l'Université Paris-Est, *Un modèle numérique original pour la simulation du manteau neigeux*. Après avoir dirigé le CEN puis le CNRM-GAME, il est chercheur dans le groupe de recherche climatique du CNRM-GAME, autour du thème des interactions neige/atmosphère @.

**Résumé.** Ce chapitre présente l'importance du manteau neigeux dans le monde, notamment en termes de ressources en eau, de rétroactions climatiques et de risques avalanches. Après une brève mise en perspective

historique, il décrit comment un modèle numérique de la génération actuelle, nommé Crocus, permet de simuler les processus principaux qui contrôlent l'évolution interne du manteau neigeux et ses interactions avec l'atmosphère et le sol sous-jacent. Plusieurs applications de ce modèle sont présentées qui balaient une large gamme d'approches méthodologiques : suivi temps réel pour des missions opérationnelles, études de processus couplant neige et atmosphère, reconstructions historiques et scénarios futurs d'enneigement. Enfin le chapitre aborde les importants défis qui se dressent encore et les perspectives pour les relever.

**Abstract.** This section first emphasizes the importance of snow cover on the Earth, especially regarding water resources, climate feedbacks and avalanche risks. After a short presentation of the history of snowpack numerical modelling, it describes a state-of-the-art model, named Crocus. It shows how the physical processes which control the evolution of the snowpack are simulated, both at the snow/atmosphere and snow/soil interfaces and inside the snowpack itself. Several applications of Crocus are presented, covering a large range of methodological approaches: real-time snow cover monitoring, research on processes coupling snow with the atmosphere, historical snow cover reconstructions and snow cover scenarios for the future. Its conclusion identifies major challenges and invokes the perspectives for tackling them.

---

Chapitre 18

**DENIS NOBLE**

***Principes de la biologie des systèmes  
et leurs applications en modélisation***

**Denis Noble** a réalisé la première modélisation par ordinateur du cœur, présentée dans deux articles de *Nature* en 1960. Entre 1984 et 2004, il a été professeur de physiologie cardiaque à l'Université d'Oxford @. Ses recherches portent sur la modélisation informatique des organes des systèmes biologiques pour en décrire le fonctionnement depuis le niveau moléculaire jusqu'à l'organisme entier. Son équipe a créé le premier organe virtuel, un cœur. En tant que secrétaire général de l'International Union of Physiological Sciences (IUPS) @, il a joué un rôle majeur dans l'avènement du projet Physiome, une action internationale visant à produire des modèles physiologiques quantitatifs à l'aide de simulations.

**Résumé.** Dans ce chapitre programmatique, Denis Noble apporte essentiellement un point de vue sur le futur de la biologie, en fait une sorte de manifeste. Son témoignage est donc important pour celui qui veut se représenter la croisée des chemins où se trouve la biologie postgénomique d'aujourd'hui, y compris dans ses versants expérimentaux traditionnellement les plus réticents aux spéculations théoriques. Il est important aussi pour celui qui veut mieux saisir en quoi la pratique de la modélisation – jusque dans ses évolutions les plus récentes – accompagne et semble devoir accompagner encore longtemps les méthodes empiriques, conceptuelles et exploratoires de la nouvelle «biologie des systèmes».

## Chapitre 19

**OLIVIER GANDRILLON****Modélisation moléculaire individu-centrée :  
contribution à une biologie des systèmes**

**Olivier Gandrillon** est biologiste moléculaire, responsable de l'équipe « Bases moléculaires de l'autorenouvellement et de ses altérations », Centre de génétique moléculaire et cellulaire, UMR CNRS 5534, Université Claude Bernard-Lyon I @.

**Résumé.** Selon Olivier Gandrillon, le but à atteindre, pour la nouvelle biologie des systèmes, est d'« être capable d'instancier, grâce à des données massives obtenues expérimentalement, des modèles dont on maîtrise le fonctionnement d'un point de vue théorique », afin de « rejoindre le "cercle vertueux" expérimentation → modélisation → expérimentation ». Les rapports entre les deux empiricités sont clairement établis : les données expérimentales servent à générer des modèles qui à leur tour conduisent à produire de nouvelles données expérimentales. S'inspirant de ses propres recherches, Gandrillon explore ici ce parti pris épistémologique. Il s'agit, avant que d'envisager la cellule complète, de comprendre au plus près de la réalité physico-chimique comment fonctionne certaines sous-parties de la cellule, les complexes multiprotéiques. L'enjeu est de taille : « L'ADN n'est jamais nu dans la cellule, il est systématiquement arrangé sous la forme d'une fibre de chromatine mêlant de l'ADN et des protéines de façon organisée. Il est de plus en plus évident que l'arrangement spatial de cette fibre de chromatine et du génome dans son ensemble a un impact profond sur la fonction de l'ADN. Connaître la séquence d'un génome est insuffisant pour comprendre sa fonction physiologique. En plus de l'arrangement complexe de la chromatine, les facteurs cellulaires qui lisent, copient et maintiennent le génome sont organisés de manière sophistiquée dans le noyau des cellules. » Compte tenu des caractéristiques de ces complexes multiprotéiques (cf. description dans Gandrillon), plusieurs hypothèses quant à leur structuration sont formulées. Rendre avérée telle ou telle de ces hypothèses nécessite de passer par une phase de modélisation de la dynamique des complexes multiprotéiques. Ici, c'est la modélisation individu-centrée qui a été retenue. L'intérêt épistémologique de cette technique de modélisation est que, en quelque sorte, il s'agit de rendre compte de comportements collectifs, voire massifs, par l'action d'unités « monadiques ». Enfin, ce chapitre pose l'intéressante question du rapport expérience de pensée-modélisation (/simulation)-expérience « vraie », en suggérant que la modélisation (/simulation) permet des instanciations effectives des expériences de pensée, qui sont, d'une certaine façon, des prémodélisations.

## Chapitre 20

**CAROLE KNIBBE****L'évolution expérimentale in silico**

**Carole Knibbe.** Maître de conférences au département Informatique de l'Université Lyon 1 @. Bio-informaticienne de formation, elle a obtenu sa

thèse en biologie computationnelle en 2006 à l'Institut national des sciences appliquées de Lyon, sous la direction de Guillaume Beslon et Jean-Michel Fayard, et a effectué un séjour post-doctoral dans l'unité Inserm U1001 de génétique moléculaire évolutive et médicale. Ses activités de recherche sont centrées sur l'évolution des génomes, et plus particulièrement sur le rôle des réarrangements chromosomiques et des phénomènes de sélection indirecte. Elle étudie ces questions en développant des techniques d'évolution expérimentale *in silico*, c'est-à-dire en créant des organismes virtuels qui mutent et se reproduisent dans l'ordinateur.

**Résumé.** L'évolution expérimentale *in silico* est une méthode d'étude des mécanismes de l'évolution et des contraintes que ces mécanismes imposent à l'organisation des cellules vivantes. Elle consiste à créer des organismes virtuels et à les laisser se reproduire et muter dans l'ordinateur. Il faut pour cela choisir une façon de représenter le génome d'un organisme, définir une biochimie artificielle permettant de déduire sa forme ou son comportement de son génome, fixer une tâche à réaliser pour survivre et se reproduire dans un environnement abstrait, et enfin déterminer les mécanismes de mutation susceptibles de se produire lorsqu'un individu réplique son génome. Cette technique, bien qu'algorithmiquement proche des algorithmes génétiques utilisés en optimisation combinatoire, est en réalité plus proche de l'évolution expérimentale réalisée en laboratoire sur des micro-organismes, à la fois en termes d'objectifs scientifiques et dans la façon dont les plans d'expérience sont conçus. L'évolution expérimentale *in silico* sert à stimuler l'intuition, à générer des hypothèses plausibles sur les mécanismes de l'évolution, en exploitant les forces de cette approche de simulation, à savoir le contrôle des paramètres et la connaissance exhaustive des relations de parenté et des mutations qui se sont produites dans les différentes lignées. Du fait des nécessaires simplifications et choix *ad hoc* effectués lors de la conception des organismes virtuels, les mécanismes découverts dans les simulations n'ont vis-à-vis des organismes réels que le statut d'hypothèses, qui devront ensuite être testées à la pailleasse. Après avoir positionné l'évolution expérimentale *in silico* par rapport aux approches voisines, ce chapitre décrit les principales familles de formalismes utilisées dans le domaine. Enfin, pour illustrer plus concrètement les méthodes employées, il décrit un exemple, le modèle *aevol*, la façon dont il est utilisé et les résultats scientifiques qu'il a permis d'obtenir.

**Abstract.** *In silico* experimental evolution is a method aimed at studying the mechanisms of evolution and the constraints these mechanisms may impose on cellular organization. Researchers create virtual organisms and let them compete for reproduction and mutate inside the computer. To do so, one must choose a formalism to represent the genome of an organism, define an artificial biochemistry to compute the organism's form or behavior from its genome, set a task that the organisms must fulfill to survive and reproduce in their abstract environment, and finally define the mutation mechanisms that will happen when an organism will replicate its genome. Although this technique is algorithmically close to the genetic algorithms

used in evolutionary computation, it is actually closer to the wet evolutionary experiments carried out by biologists on microorganisms, both in terms of scientific objectives and in terms of experimental design. *In silico* experimental evolution is used to stimulate the intuition, to generate plausible hypotheses on the mechanisms and effects of evolution. The strengths of this simulation approach are the easy way the parameters can be controlled, the possibility to run many repetitions, and the perfect fossil record. However, because simplifications are inevitably made when designing the virtual organisms and their biochemistry, the mechanisms discovered in the simulations are merely hypotheses as far as real organisms are concerned, and these hypotheses must be tested by wet evolutionary experiments. After having positioned *in silico* experimental evolution with respect to related approaches, this chapter describes the main families of formalisms used in the field. Finally, to illustrate more concretely the methods currently used, an example is given based on the *aevol* model, the way it is used and the scientific results it allowed for.

---

## Chapitre 21

**JEAN-PIERRE MAZAT**

### ***Une petite histoire de la modélisation du métabolisme cellulaire. Vers une théorie du métabolisme en biologie***

**Jean-Pierre Mazat** est biochimiste, Inserm U688, Laboratoire de métabolisme énergétique cellulaire, Université Bordeaux 2 @. Il travaille notamment sur la modélisation du métabolisme mitochondrial, en vue de la réalisation d'une mitochondrie virtuelle.

**Résumé.** Jean-Pierre Mazat aborde la question des modèles en biologie via ses recherches sur le métabolisme mitochondrial, et esquisse «une petite histoire de la modélisation du métabolisme cellulaire». Là encore, le système à étudier, le métabolisme, est extrêmement profus et l'une des difficultés majeures est donc de prendre en compte cette profusion et d'en rendre compte de façon intelligible. Pour donner une idée du défi empirique, Mazat cite les chiffres issus d'une estimation récente : 2766 réactions et 3311 métabolites lors du fonctionnement d'une cellule. La question de la description, de la modélisation des réseaux métaboliques se pose avec une particulière acuité, quand on songe à la combinatoire possiblement engendrée par de tels chiffres : «Lorsque l'on cherche à décrire tous les chemins que l'on peut parcourir dans un réseau métabolique qui lie, notamment, deux métabolites, on est rapidement confronté à une augmentation explosive du nombre de ces chemins.» Des exemples de modélisation sont exposés, permettant de saisir de façon approchée et plausible «le flux des métabolites à travers un réseau métabolique» et surtout de rétorquer efficacement à des assertions courantes dans la littérature biochimique, que conteste Mazat, pour qui «des modélisations très simples sur des réseaux métaboliques élémentaires (deux réactions successives par exemple) peuvent permettre de se rendre compte rapidement de [leur] inexactitude». Enfin, Mazat esquisse ce qu'il

considère être pleinement une théorie en biologie, dans laquelle les modèles sont autant de sous-parties de la théorie générale.

## Chapitre 22

**PHILIPPE DE REFFYE & MARC JAEGER**

### **Modèles mathématiques du développement et de la croissance de l'architecture des plantes. Le cas du modèle GreenLab**

**Philippe de Reffye** est ingénieur agronome, docteur ès sciences, chercheur au Cirad. Il a créé les programmes Amap du Cirad, GreenLab de l'Institut d'automatique et de l'Académie d'agriculture de Chine, et Digiplante avec l'Inria et l'École centrale. Il a dirigé les équipes pluridisciplinaires de ces unités, développant les modèles de croissance et d'architecture de végétaux Amap et GreenLab et leurs implémentations logicielles (AMAPsim, Digiplante, Group, QingYuan) pour l'agronomie et la synthèse d'images @.

**Marc Jaeger** est informaticien, docteur ès sciences, ingénieur de recherches au Cirad. Spécialiste en imagerie, il a développé avec le modèle de Philippe de Reffye les premières représentations réalistes du monde végétal. Après une décennie consacrée à l'imagerie médicale, il construit avec ses collègues de Chine les représentations multi-échelle des modèles Amap et GreenLab. Ses développements logiciels ont conduit à des projets industriels et la création d'entreprises (BIONATICS SA, INTRASENS) @.

**Résumé.** La modélisation mathématique du développement et de la croissance des plantes autorise aujourd'hui de multiples applications couvrant de vastes domaines de l'agronomie aux applications multimédia. L'architecture des plantes est le résultat de l'activité des méristèmes à l'origine du développement des axes qui établit la structure, et des relations sources puits qui régissent la compétition entre les divers organes de la plante et contrôlent leurs expansions. Grâce à l'utilisation d'opérateurs mathématiques compacts, construits sur les connaissances botaniques et agronomiques, on peut écrire des algorithmes efficaces qui dénombrent les organes produits et calculent leurs volumes. Ces formalismes permettent de quantifier la production végétale de la plante tout au long de son développement. L'analyse du comportement du modèle, proposée sur des cas simples, illustre la plasticité de l'approche, reflétant des stratégies de développement et de croissance de plantes agronomiques communes. Ce modèle peut s'appliquer à de nombreuses études de plantes, bien que la description se limite ici au seul cas du développement déterministe, sans interaction entre croissance et développement. Nous citons enfin les grands principes mis en œuvre pour obtenir la description géométrique tridimensionnelle de la structure, puis les techniques permettant sa visualisation rapide et réaliste.

**Abstract.** Plant architecture development and growth mathematical modeling shows nowadays increasing interests in multiples areas ranging from agronomy to multimedia topics. Plant architecture results from meristems activities, developing axis establishing the plant structure, and from the various organ compartment source-sink relations, regulating their mutual

competitions and expansions. Efficient algorithms, computing organ numbers and their associated biomass can be designed, thanks to compact mathematical operators, issued from botanical and agronomic experience and knowledge. The proposed formalism quantifies the biomass dynamics along plant's life. The model study behavior, held on simple cases illustrates the plasticity of the approach, reflecting various usual crop individuals growth and development strategies. The model open a wide range of studies; its description is nevertheless restricted here to the simple deterministic case, ignoring also growth with development interactions. Basis of the plant simulated three dimensional structure geometrical definition are finally exposed, including some techniques related to their fast and realistic visualization.

---

### Chapitre 23

**SYLVAIN CUSSAT-BLANC, HERVÉ LUGA & YVES DUTHEN**

#### **Modélisation et conception de créatures artificielles**

**Sylvain Cussat-Blanc** est maître de conférences dans l'équipe Vortex de l'Irit depuis septembre 2012 @. Docteur en informatique depuis novembre 2006, le thème de sa thèse est la génération de créatures artificielles par embryogenèse artificielle. Il est ensuite parti en post-doctorat à l'Université de Brandeis durant lequel il a appliqué les méthodes d'embryogenèse à la génération de plan de robot modulaires. Il est intéressé par la génération de créatures artificielles et l'application de ces techniques bio-inspirées à la résolution de problèmes d'optimisation. **Hervé Luga** est maître de conférences habilité à diriger des recherches à l'Université Toulouse Capitole @. Ses travaux sont centrés sur l'utilisation de techniques bio-inspirées pour générer de formes et des comportements en espace virtuel. D'un point de vue théorique il s'intéresse aux problématiques d'interaction entre systèmes générateurs, d'apprentissage et d'évolution. Le champ applicatif s'exprime dans des domaines variés allant de la création artistique aux comportements d'humains virtuels et à la création de créatures artificielles. **Yves Duthen** est professeur d'informatique, dirige des recherches en vie artificielle et réalité virtuelle dans l'équipe Vortex de l'Institut de recherche en informatique de Toulouse (Irit) @. Docteur en informatique en 1983 puis habilité à diriger de recherches en 1993, il a travaillé successivement dans les domaines de la synthèse d'images et des machines parallèles puis de la simulation comportementale d'avatars jusqu'à la synthèse de créatures artificielles. Ardent promoteur de mécanismes évolutifs pour faire émerger par «évolution» des solutions à un problème donné, les travaux de son équipe portent actuellement sur l'évolution de systèmes de développement appelé «*morphogenetic engineering*». Équipe Vortex-Irit-CNRS UMR 5505, Université de Toulouse.

**Résumé.** Dans ce chapitre, nous présentons les éléments fondamentaux de la conception de créatures artificielles, en partant des travaux séminaux de Karl Sims présentés à SIGGRAPH en 1994 jusqu'aux travaux récents de recherche sur les *êtres virtuels*, basés sur la modélisation d'un développement cellulaire. Des recherches très variées reposent actuellement sur

un principe de croissance pour synthétiser des créatures artificielles toujours plus complexes mais également pour concevoir des robots modulaires à l'aide de prototypes capables de s'automodéliser, de s'autoproduire ou de s'auto-assembler. Inspirées par la biologie, ces recherches reprennent des paradigmes de la nature en considérant la *créature* comme le résultat d'un processus développemental à partir d'un élément unique : la cellule. Cette approche ne nécessite pas seulement de nouveaux simulateurs (chimiques ou hydrodynamiques) mais aussi de nouveaux mécanismes tels que des *réseaux de régulation génétique artificiels* pour contrôler le processus développemental. Ces êtres artificiels peuvent également intégrer un métabolisme très simple : ils sont capables de transformer leur environnement local afin de croître et de développer des *organes* virtuels.

**Abstract.** In this chapter, we emphasize the most crucial developments in the design of artificial creatures starting with the seminal work of Karl Sims presented at the SIGGRAPH'94 conference and ending with the latest research in virtual beings based on cell development. Nowadays, much research relies on the same principles in order to generate more and more complex artificial beings but also to advance evolutionary robotics with prototypes capable of self-modeling, self-reproduction and self-assembly. Inspired by biology, this research moves closer to nature paradigms, considering the creature as the result of a developmental process of a single element: a cell. This approach does not only need new simulators (chemical or hydrodynamical) but also new mechanisms such as *artificial gene regulatory networks* to control the developmental process. These artificial beings can also have a very simple metabolism : they are able to transform their local environment in order to grow and develop virtual organs.

---

Chapitre 24

**S. RANDY THOMAS**

**Vers le «patient virtuel». Modélisation intégrative des fonctions rénales et cardiovasculaires**

**S. Randall Thomas** est directeur de recherche au CNRS (IR4M UMR8081, Orsay et Villejuif) @. Il est physiologiste, spécialiste de la modélisation du rein. "Kidney Modeling and Systems Physiology", *Wiley Interdisciplinary Reviews: Systems Biology and Medicine*, 1, 2009, p. 172-190. "Robert Rosen in the age of systems biology", *Chem Biodivers*, 4(10), 2007, p. 2407-2414. S.R. Thomas *et al.*, "SAPHIR: an integrated multiscale, multi-resolution Core Model Environment – with prototype Guyton-based example core model", *PTRS A 366(1878)*, 2008, p. 3175-3197. R. Moss *et al.*, "Virtual Patients and Sensitivity Analysis of the Guyton Model of Blood Pressure Regulation: Towards Individualized Models of Whole-Body Physiology", *PLoS Comp. Biol.* 8(6), 2012, e1002571. [stephen-randall.thomas@u-psud.fr](mailto:stephen-randall.thomas@u-psud.fr)

**Résumé.** La modélisation du vivant doit faire face à des problèmes liés au fait que, parmi les systèmes complexes, le vivant est spécial. Comme d'autres systèmes complexes, selon la formulation de Robert Rosen, on ne peut approcher une description complète qu'avec une infinité de modèles



partiels. La mission du Physiome (ou *Virtual Physiological Human*, en Europe) est de développer une trousse d'outils qui permettra la constitution collaborative d'une telle collection de modèles (avec les données associées), qui couvrira à terme l'ensemble de nos connaissances sur le fonctionnement de l'organisme. Ici, nous discutons un projet associé à cet effort, centré sur la modélisation multi-échelle de la régulation de la pression artérielle, avec une discussion sur le rapport entre ce projet et les principes épistémologiques, avec une attention particulière sur *la relation de modélisation* selon Rosen.

**Abstract.** Mathematical modeling of organisms faces particular problems related to the fact that, among complex systems, organisms are special. As for complex systems in general, according to the formulation of Robert Rosen, there is no *largest model*, i.e., one can approach a complete description only with an infinity of partial, local models. The mission of the *Physiome* (or *Virtual Physiological Human*, in Europe) is to develop a set of tools that will enable the collaborative construction of just such an infinity of interoperable models (along with the associated data) that will eventually cover all our knowledge of physiological function, from gene to organism. In this chapter, we discuss one project associated with the Physiome effort, centered on multi-scale modeling of blood pressure regulation, with a discussion of the relationship between this project and underlying epistemological principles, with particular attention to Rosen's explanation of the *modeling relation*.

---

Chapitre 25

**MAGALIE OCHS**

### **Modélisation et simulation des émotions dans des entités artificielles**

**Magalie Ochs** est chercheur en informatique au CNRS-LTCI à Télécom ParisTech @. Après l'obtention de son master en intelligence artificielle à l'Université de Montréal, Magalie Ochs a réalisé son doctorat en informatique à l'Université Paris 8 sur la modélisation et la formalisation de l'empathie dans les agents virtuels. Elle a mené des recherches dans le domaine de l'informatique affective à Orange Labs (France Télécom R&D), au Laboratoire d'informatique de l'Université Paris 6 et au National Institute of Informatics à Tokyo. Elle mène aujourd'hui des recherches au CNRS sur l'intégration d'une dimension sociale et émotionnelle dans les agents conversationnels animés pour améliorer l'interaction humain-machine. [magalie.ochs@telecom-paristech.fr](mailto:magalie.ochs@telecom-paristech.fr)

**Résumé.** Les ordinateurs, au cœur de notre quotidien, incarnent de plus en plus des rôles typiquement attribués aux humains, tels que celui de professeur, de conseiller ou encore d'animateur. Pour incarner ces rôles, les machines ne doivent plus seulement être dotées d'une forte puissance de calcul, mais aussi d'une intelligence leur permettant de raisonner sur la dimension sociale et émotionnelle de l'interaction, c'est-à-dire une intelligence émotionnelle. Concevoir des systèmes informatiques dotés d'une intelligence émotionnelle nécessite le développement de modèles

d'émotions permettant de créer des ordinateurs capables de reconnaître les émotions des utilisateurs, d'exprimer eux-mêmes des émotions, et d'adopter un comportement émotionnel pour améliorer l'interaction humain-machine.

**Abstract.** The computers are more and more used to embody some roles typically performed by humans, as for example the role of tutor or actor. To play such roles, the computers should be endowed with an intelligence to reason on the social and emotional dimension of the interaction, i.e. an emotional intelligence. To create such interactive systems with emotional intelligence, models of emotions are necessary for the automatic recognition of users' emotions and to give the capability to computers to simulate through their expressions and actions, in order to improve the human-machine interaction.

---

## Chapitre 26

**ALAIN PAVÉ**

### **Jean-Marie Legay (1925-2012), pionnier de la modélisation**

**Alain Pavé**, biologiste modélisateur, est professeur d'université émérite à l'Université Claude-Bernard Lyon 1, équipe «Modélisation et écotoxicologie prédictives» et CNRS @.

---

## Chapitre 27

**BERNARD WALLISER**

### **Les modèles de l'économie cognitive**

**Bernard Walliser** est professeur à l'École nationale des ponts et chaussées et directeur d'études à l'École des hautes études en sciences sociales. Il poursuit ses recherches à Paris-Sciences économiques @, d'une part sur l'économie cognitive, d'autre part sur la méthodologie de l'économie. *L'Économie cognitive* (Odile Jacob, 2000; version anglaise augmentée, *Cognitive economics*, Springer, 2007) et, avec Jacques Lesourne et André Orléan, *Leçons de microéconomie évolutionniste* (Odile Jacob, 2002).

**Résumé.** Bernard Walliser est l'un des chercheurs français qui a le plus tôt, le plus constamment et le plus profondément réfléchi sur les modèles. Il n'est que de rappeler son livre influent de 1977 : *Systèmes et modèles. Introduction critique à l'analyse des systèmes*. Ce travail fondait une réflexion large mais déjà distancée et critique sur l'approche systémique, tant en sciences humaines qu'en biologie. Il faisait dépendre l'épistémologie appliquée des modèles de la notion même de système. On y lisait cette phrase : «Dans sa définition la plus large, la notion de modèle recouvre toute représentation d'un système réel, qu'elle soit mentale ou physique, exprimée sous forme verbale, graphique ou mathématique» (p. 116). La notion de système prévalait donc sur celle de modèle. Dans ce livre, en outre, l'influence de la cybernétique et de l'approche par la théorie des graphes paraissait encore manifeste. Il était donc particulièrement excitant de chercher à savoir, trente ans après, où en était à ce sujet le chercheur désormais reconnu mondialement en économie cognitive. L'auteur y propose des distinctions générales,

des classifications et des clarifications au sujet des différents types de modèles et de leurs fonctions. Un tel niveau de clarté et de généralité permet sans mal au lecteur d'élargir ou de mettre en perspective une grande partie de ces considérations par rapport aux autres domaines des sciences de l'homme mais aussi des sciences de la vie. Cependant, l'objectif principal de l'auteur est de brosser un tableau cursif mais aussi complet que possible des formes et des usages des modèles en économie cognitive, à savoir successivement les rôles iconique, démonstratif, empirique, heuristique, praxéologique, rhétorique.

---

Chapitre 28

**GUILLAUME DEFFUANT, SYLVIE HUET & TIMOTEO CARLETTI**

***La complexité d'un modèle simplifié d'interactions sociales :  
le modèle Léviathan***

**Guillaume Deffuant** est directeur de recherche à Irstea (Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture, ex-Cemagref) @. Ses recherches portent sur la modélisation des systèmes écologiques et sociaux. Il est responsable du laboratoire d'ingénierie des systèmes complexes et codirecteur du GIS «Réseau national des systèmes complexes». Il a soutenu une thèse en sciences de la cognition en 1992 et une habilitation à diriger des recherches à l'Université Blaise-Pascal de Clermont-Ferrand en 2004 @. **Sylvie Huet** est titulaire d'un diplôme d'ingénieur en informatique et d'un doctorat en informatique. Elle a par ailleurs un DEUG en sciences humaines. Elle s'intéresse plus particulièrement aux modèles individus-centrés permettant d'étudier les dynamiques sociales. Ses recherches portent d'une part sur les dynamiques d'opinion étudiées dans un cadre théorique, aux dynamiques de populations humaines étudiées dans un cadre applicatif d'autre part. Elle est actuellement employée au Laboratoire d'ingénierie pour les systèmes complexes (Lisc) de Irstea, centre Auvergnat @. **Timoteo Carletti**. Après une maîtrise en physique (Université de Florence, 1995) Timoteo Carletti a poursuivi ses études doctorales entre Florence et l'IMCEE, Paris, et finalement défendu sa thèse de doctorat en mathématique en 2000. Après plusieurs séjours de recherche postdoctoraux – notamment, Paris XI, IMPA (Rio de Janeiro), ENS Pise –, il a été engagé comme *senior researcher* dans le cadre du projet Européen PACE (Université de Venise). En 2005, il est engagé à l'Université de Namur comme chargé de cours, ensuite comme professeur, et finalement comme professeur ordinaire, au département de mathématique @. Depuis 2010, il assume la direction du Namur Center for Complex Systems. Il a supervisé plusieurs thèses et mémoires de master. Il contribue activement à la formation doctorale et postdoctorale dans le domaine de systèmes complexes en Belgique grâce à sa présidence de l'école doctorale thématique FNRS «COMPLEX». Il est auteur d'une cinquantaine de séminaires et d'autant publications, dans des domaines aussi variés que : accélérateurs de particules, biologie, dynamiques sociales, économie, mécanique céleste, chaos, systèmes dynamiques.

**Résumé.** Nous décrivons un modèle de dynamique d'opinions dans lequel les agents se rencontrent deux à deux de manière aléatoire et font évoluer les opinions qu'ils ont les uns des autres par des mécanismes de vanité et de propagation. Les simulations révèlent une grande richesse de comportements du modèle lorsque les paramètres varient. Nous avons identifié cinq types de dynamiques : égalité, élite, crise, hiérarchie, domination. Nous étudions l'apparition de ces types de dynamiques lorsque les paramètres du modèle varient et nous en proposons des explications théoriques partielles. Enfin, nous discutons l'intérêt de cette approche dans une perspective plus large des sciences sociales.

**Abstract.** We propose an opinion dynamics model that combines processes of vanity and opinion propagation. The interactions take place between randomly chosen pairs. During an interaction, the agents propagate their opinions about themselves and about other people they know. Moreover, each individual is subject to vanity: if her interlocutor seems to value her highly, then she increases her opinion about this interlocutor. On the contrary she tends to decrease her opinion about those who seem to undervalue her. The combination of these dynamics with the hypothesis that the opinion propagation is more efficient when coming from highly valued individuals, leads to different patterns when varying the parameters. For instance, for some parameters the positive opinion links between individuals generate a small world network. In one of the patterns, absolute dominance of one agent alternates with a state of generalised distrust, where all agents have a very low opinion of all the others (including themselves). We provide some explanations of the mechanisms behind these emergent behaviors and finally propose a discussion about their interest.

---

Chapitre 29

**JULIETTE ROUCHIER**

***Construire la discipline «simulation agents».***

***Les pistes proposées et un exemple***

**Juliette Rouchier** a fait des mathématiques avant de se tourner vers la simulation agents et les problématiques environnementales. Elle travaille depuis 2001 au CNRS, et a encadré des étudiants de master et de doctorat au sein de son laboratoire, le Greqam (Groupement de recherche en économie quantitative d'Aix-Marseille) @. Elle a travaillé sur la représentation d'agents échangeant dans le cadre de plusieurs institutions de marché et s'adaptant par divers processus d'apprentissage ; sa thématique phare est la place de la confiance et de la familiarité dans les relations marchandes. Elle a aussi développé des modèles d'influence sociale et d'apprentissage collectif. Elle se tourne de nouveau vers l'environnement et propose des modèles d'action aptes à préserver les ressources. Dans tous ces travaux, les questions de méthodes et de validation se sont posées, et elle a également développé une réflexion à ce propos. On trouve ses articles dans *JASSS*, *JEDC*, *Computational Economics*, *Journal of Knowledge Management* et des livres collectifs.

**Résumé.** Ce chapitre présente les choix méthodologiques qui ont été mis en avant par la communauté qui s'est constituée autour de l'usage de la simulation agents en sciences sociales. Une association européenne, une américaine et une asiatique se sont créées et leurs membres ont très vite communiqué entre eux pour consolider collectivement l'accumulation du savoir dans la discipline. Deux workshops (M2M et EPOS) se sont mis en place spécifiquement pour positionner clairement les méthodes de validation, de comparaison, et de communication des résultats. Les recommandations qui en ont résulté sont de plus en plus suivies par les praticiens de la simulation agents. Dans ce texte sont développés les principaux axes des recommandations, ainsi que les propositions de méthodes et de diffusion de modèles. Un exemple est ensuite donné, concernant le modèle d'influence sociale dit «modèle à la Deffuant» qui a été publié au début des années 2000. Depuis sa parution, cet article a été abondamment cité, le modèle a été repris, transformée, adapté à divers contextes, et des discussions sur la vérification et la validation de ce modèle ont eu lieu. Les auteurs du modèle original sont en outre très présents dans la participation à ces débats et dans la diversification des usages et des interprétations de ce modèle. Ces réflexions et les applications qui en découlent montrent combien la simulation agents pour les sciences sociales est dorénavant armée pour se développer comme une branche scientifique à part entière.

**Abstract.** This paper presents methodological choices that have been put forward by the community of social scientists using agent-based models. A European association has been created, in parallel with an American and an Asian one, and their members have soon communicated to build up knowledge accumulation in this branch. Two workshops (M2M and EPOS) have been organized to define precise validation, comparison and communication methods. It can be noticed that agent-based practitioners follow more and more regularly these resulting recommendations. In this text the main axes of recommendations are developed, as well as proposals made for methodology and model diffusion. As an example, discussions and follow up of the "Deffuant model" of social influence, which was published in the early 2000's, are discussed. Since it was published, this paper has been cited, the model has been re-use, transformed, adapted to diverse contexts and was criticized on verification and validation issues. His authors are very careful to participate in these debates, but also to carry on the diversification of its uses and interpretations. These thoughts and all resulting applications show that agent-based simulation for social sciences now have enough fuel to develop as an independent scientific branch.

---

Chapitre 30

**GUILLAUME COSTESEQUE**

**Modélisation du trafic routier:  
passage du microscopique au macroscopique**

**Guillaume Costeseque** est titulaire d'un diplôme d'ingénieur de l'École des travaux publics de l'État et d'un master de génie civil de l'École centrale de

Lyon. Il est actuellement en thèse de doctorat à l'École des Ponts ParisTech sous la direction de Jean-Patrick Lebacque et Régis Monneau. Ses travaux portent sur la modélisation du trafic routier et plus particulièrement sur les liens existants entre modèles microscopiques et macroscopiques. Son travail a été récompensé par le 1<sup>er</sup> prix international de recherche Abertis en 2012 @.

**Résumé.** Ce chapitre se propose de décrire les liens entre la modélisation et la simulation dans le cadre du trafic routier. Pour cela, il offre un panorama des modèles mais aussi des outils de simulation les plus courants dans ce domaine particulier. Il est ainsi montré que la modélisation et la simulation sont deux champs disciplinaires distincts mais qui demeurent toutefois fortement corrélés l'un à l'autre. En effet, modélisation et simulation interagissent afin de rendre compréhensible un phénomène physique relativement complexe.

**Abstract.** This book chapter seeks to describe the relationship between modeling and simulation in the framework of road traffic. For this aim, it provides an overview of models but also of simulation tools which are mainly used in this special domain. It is shown that modeling and simulation are two separate disciplines but they nevertheless remain highly correlated one to each other. Indeed modeling and simulation interact in such a way to make it understandable a relatively complex physical phenomenon.

---

## Chapitre 31

**ARNAUD BANOS & LENA SANDERS**

### **Modéliser et simuler les systèmes spatiaux en géographie**

**Arnaud Banos** est chargé de recherche au CNRS, membre de l'UMR Géographie-Cités (Paris1-Paris7-CNRS) @, directeur adjoint de l'Institut des systèmes complexes de Paris Ile-de-France et du réseau européen S4. Il est géographe, spécialisé dans le domaine de la modélisation des systèmes spatiaux. **Lena Sanders** est directrice de recherche au CNRS, membre du laboratoire Géographie-Cités @. Ses travaux portent sur l'évolution des villes et des systèmes de peuplement et utilisent l'analyse spatiale et la modélisation dynamique. Elle s'est intéressée au transfert des concepts et des méthodes entre les disciplines et a développé plusieurs collaborations interdisciplinaires, avec des archéologues et des philosophes d'un côté, des physiciens et des informaticiens de l'autre. Médaille d'argent du CNRS en 2005.

**Résumé.** La modélisation des systèmes spatiaux complexes est une des préoccupations des géographes, toujours soucieux de mettre en relation les structures spatiales détectées avec des familles de processus susceptibles d'en être à l'origine. Les manières d'appréhender ce problème général sont toutefois très diverses et varient en fonction des contextes et des époques. Ce chapitre propose une grille de lecture permettant d'ordonner et de catégoriser les *modus operandi*, mais également d'établir des filiations entre les modèles. Cette grille de lecture permet également de poser les bases d'une démarche globale de modélisation raisonnée et vertueuse, alliant niveau d'abstraction et degré de simplification des processus modélisés.

**Abstract.** Modelling complex spatial systems is one of the classic focuses of geographers, always keen to put altogether spatial structures with families of processes able to produce them. However, ways and means to address such an issue are very diverse and vary according to context, time; disciplines and people. In this chapter we propose a framework allowing categorising and classifying modelling practises in the domain, but also to establish connections between different approaches.

---

Chapitre 32

**RAPHAËL DUBOZ & JEAN-PIERRE MÜLLER**

***Modélisation des socio-écosystèmes.***

***Instrumenter le dialogue multidisciplinaire***

**Raphaël Duboz** est titulaire de deux masters, le premier en informatique obtenu en 1998 à l'université d'Aix-Marseille et le second en modélisation et analyse de données en océanologie, obtenu en 1999 à l'université Paris 6. Après son service militaire en tant que scientifique du contingent, il s'engage dans une thèse de doctorat en informatique appliquée à la modélisation et la simulation des systèmes complexes qu'il obtient en 2004, à l'Université du Littoral Côte d'Opale. Il effectue ensuite un post-doctorat à l'IRD pendant lequel il développe des modèles en écologie marine et estuarienne. Depuis 2008, il travaille au Cirad dans l'équipe Agirs (Animal et gestion intégrée des risques) en tant que chercheur en modélisation dans un contexte multidisciplinaire @. Ses travaux concernent la modélisation et la simulation à base d'agents, l'intégration opérationnelle de modèles dynamiques spécifiques dans des formalismes hétérogènes, les systèmes à événements discrets, la modélisation multi-échelles, l'analyse des réseaux et les laboratoires virtuels. **Jean-Pierre Müller** est ingénieur en informatique de l'EPFL (Suisse), docteur en informatique en 1987 à l'INPG et son HDR en 2002 à l'Université Montpellier II. Professeur d'informatique à l'Université de Neuchâtel (Suisse) de 1987 à 2001, il a travaillé et dirigé une équipe en intelligence artificielle appliquée à la robotique et en systèmes multi-agents appliqués à la productique et à la simulation des systèmes complexes adaptatifs. Directeur de recherche au Cirad depuis 2001, il a rejoint l'UR Gestion des ressources renouvelables et environnement (Green). Il y travaille sur la modélisation et la simulation des systèmes complexes, appliquées aux socio-écosystèmes, dans un contexte multidisciplinaire.

**Résumé.** La modélisation des socio-écosystèmes pose le problème non seulement de l'intégration des mathématiques et de l'informatique dans des disciplines thématiques différentes (écologie, géographie, économie, etc.), mais aussi du dialogue des disciplines thématiques entre elles. Ce dialogue peut se faire à différents niveaux: entre différentes théories disciplinaires, entre des formalismes mathématiques hétérogènes, voire entre des modèles informatiques développés séparément. Nous abordons successivement ces trois niveaux de dialogue. Au niveau théorique, les différents discours sont retranscrits en utilisant diverses méthodes de représentation des connaissances qu'il s'agit d'articuler. Au niveau formel, nous

mentionnons les formalismes les plus couramment utilisés en modélisation et montrons qu'il est possible de les intégrer de façon cohérente grâce au formalisme DEVS. Finalement, la version opérationnelle de ce même formalisme DEVS offre un intergiciel très puissant pour coupler des modèles développés séparément. Ceci ouvre de nombreuses perspectives pour couvrir l'ensemble du processus de modélisation et de simulation depuis le dialogue multidisciplinaire jusqu'à son implémentation informatique.

**Abstract.** Socio-ecosystems modeling raises on one side the problem of the integration of mathematics and computer sciences within different thematic disciplines (ecology, geography, economy, etc.) and on the other side the issue of the dialogue between the thematic disciplines themselves. This dialogue can occur at various levels: among various disciplinary theories, among heterogeneous mathematical formalisms, moreover among computer models separately developed. We successively present those three dialog levels. At the theoretical level, the various discourses are made explicit using various knowledge representation methods that have to be articulated. At the formal level, we enumerate the commonly used formalisms for modeling and show how it is possible to integrate them using the DEVS formalism. Finally, the operational version of this DEVS formalism offers a very powerful middleware to couple independently developed models. This opens numerous perspectives to cover the whole process of modeling and simulation from the multi-disciplinary dialogue up to its computerized implementation.

---

## Chapitre 33

**MARTINE ROBERT**

### **Modèles et simulations en histoire : un état des lieux**

**Martine Robert** enseigne la philosophie au lycée Jacques Feyder à Epinay-sur-Seine, doctorante sous la direction de Gilles Campagnolo et Franck Varenne, sur le sujet: «Vivre le passé au présent, dimensions et valeurs de la forme du jeu vidéo au regard de l'épistémologie de la connaissance historique», depuis 2008.

**Résumé.** La simulation informatique a comme caractéristique, par différence avec le modèle, de prendre en charge la dimension dynamique des phénomènes. Plus encore, la possibilité qu'elle offre d'articuler, en les combinant, différents types de modèles permet de parler, à son sujet, d'une «expérience concrète». Ce qui s'y joue est irréductible à ce qui se laisse prévoir par la pensée, elle ouvre sur un inédit, qui ne se laisse appréhender, selon une expression utilisée par de nombreux auteurs, que par une «histoire d'états». Est-ce à dire pour autant que la simulation est propre à appréhender les phénomènes envisagés dans leur historicité, de telle sorte qu'elle puisse être mise au service des sciences historiques? Une tendance actuelle, qui consiste à introduire de plus en plus de données au sein des simulations utilisées par exemple dans les sciences sociales ou dans les sciences du vivant, semble aller dans ce sens. Cependant, l'importation, même exponentielle, de données au sein de la simulation ne saurait



résorber la distance qui subsiste entre les modèles, nécessairement généralisants, qui sont au fondement de la simulation, et le déploiement, qui est, par nature, individualisé, des phénomènes historiques.

**Abstract.** What characterizes Computer simulation, by difference with the model, is its capacity to take into account the phenomena's dynamical dimension. Furthermore, the possibility it offers to articulate different types of models combining them allows to say it provides a « concrete experience ». What takes place in it is irreducible to what the thought can foresee since it brings novelty, that can only be apprehended through what several authors call a « story of states ». Does this mean that simulation is able, by nature, to apprehend the phenomena considered in their historicity, so that it might be used in historical sciences ? An actual trend, consisting in introducing more and more data within the simulations run for instance in social sciences or life sciences, would indicate that direction. However, the data importation, even exponential, within the simulation cannot fill the distance remaining between models, necessarily generalizing, that are at the basis of simulation and the development of historical phenomena, that is, by nature, individualized.

