

Article

« Pourquoi un cadre ontologique pour la modélisation multi-agents en sciences humaines et sociales? »

Denis Phan

Nouvelles perspectives en sciences sociales, vol. 5, n° 2, 2010, p. 101-133.

Pour citer cet article, utiliser l'information suivante :

URI: <http://id.erudit.org/iderudit/044079ar>

DOI: 10.7202/044079ar

Note : les règles d'écriture des références bibliographiques peuvent varier selon les différents domaines du savoir.

Ce document est protégé par la loi sur le droit d'auteur. L'utilisation des services d'Érudit (y compris la reproduction) est assujettie à sa politique d'utilisation que vous pouvez consulter à l'URI <https://apropos.erudit.org/fr/usagers/politique-dutilisation/>

Érudit est un consortium interuniversitaire sans but lucratif composé de l'Université de Montréal, l'Université Laval et l'Université du Québec à Montréal. Il a pour mission la promotion et la valorisation de la recherche. Érudit offre des services d'édition numérique de documents scientifiques depuis 1998.

Pour communiquer avec les responsables d'Érudit : info@erudit.org

Pourquoi un cadre ontologique pour la modélisation multi-agents en sciences humaines et sociales?

DENIS PHAN¹

GEMAS, CNRS & Université Paris IV Sorbonne

Depuis une quinzaine d'années, la modélisation à base « d'agents » permet de conceptualiser et de simuler un ensemble organisé d'entités en interactions. Pour Axtell², la modélisation et la simulation à base d'agents en sciences sociales arrivent à « la fin des débuts ». Nous entrons ainsi dans une nouvelle phase, par la conjonction des connaissances accumulées et de l'augmentation de la puissance des systèmes et des langages

¹ Cette note résume les principes du projet COSMAGEMS financé par l'Agence nationale pour la recherche (ANR) entre 2007 et 2009. L'auteur remercie l'ensemble des participants à ce projet pour leur contribution à l'avancement des idées sur le sujet, en particulier ses co-auteurs sur un certain nombre de travaux issus du projet : Jacques Ferber, Leonardo Lana de Carvalho, Patrice Langlois, Jean-Pierre Müller, Franck Varenne, avec une mention particulière à Lena Sanders, Pierre Livet et Christophe Sibertin-Blanc pour leurs remarques sur la présente note.

² Robert L. Axtell, « La fin des débuts pour les SMA en sciences sociales », dans Frédéric Amblard et Denis Phan (dir.), *Modélisation et simulation multi-agents, applications pour les sciences de l'homme et de la société*, Londres, Hermes-Sciences & Lavoisier, 2006, p. 161-172 [traduction anglaise : « The End of the Beginning for Multi-Agent Systems in Social Sciences », dans Denis Phan et Frédéric Amblard (dir.), *Agent-Based Modelling and Simulation in the Social and Human Sciences*, Oxford, The Bardwell Press, 2007, p. 135-146].

informatiques. Dans cette phase, de nouvelles méthodes de modélisation devront être utilisées.

De l'informatique aux sciences humaines et sociales

En informatique, les systèmes multi-agents (SMA) mettent en œuvre un ensemble de concepts et de techniques qui permettent à des composants logiciels relativement autonomes appelés « agents » d'interagir dans ces systèmes. Plus spécifiquement, un agent est une entité informatique (associée à un processus) située dans un environnement structuré, pouvant percevoir de l'information sur cet environnement, communiquer avec les autres agents et agir³. Les « actions » d'un agent peuvent être motivées par des objectifs, conditionnées par des ressources, des compétences et l'information disponible.

Dans les sciences humaines et sociales (SHS), la modélisation à base « d'agents » permet de formaliser des situations complexes comportant des échelles (spatiales, temporelles, organisationnelles) multiples et des agents hétérogènes engagés dans des activités sociales⁴. Cette méthode est utilisée en particulier en

³ Jacques Ferber, *Les systèmes multi-agents*, Paris InterEditions, 1995 [édition anglaise : *Multi-Agent Systems: An Introduction to Distributed Artificial Intelligence*, Harlow, Addison Wesley Reading, 1999] et Jacques Ferber, « Introduction aux concepts et méthodologies de conception multi-agents », dans Frédéric Amblard et Denis Phan (dir.), *op. cit.*, p. 23-48 [traduction anglaise : « Multi-Agent Concepts and Methodologies », dans Denis Phan et Frédéric Amblard (dir.), *op. cit.*, p. 7-34].

⁴ Frédéric Amblard et Denis Phan (dir.), *op. cit.*

écologie⁵, en géographie⁶, en économie⁷, en sociologie⁸. Elle permet de conceptualiser et de simuler sur ordinateur des « sociétés artificielles »⁹ pouvant reproduire des situations spatiales, temporelles, organisationnelles, sociales et cognitives complexes. Les agents peuvent être dotés de capacités plus ou moins développées, allant des agents réactifs constitutifs de l'intelligence collective¹⁰ aux agents cognitifs dotés de formes de rationalité plus sophistiquées. L'approche agent peut être rattachée dans certaines disciplines à des cadres conceptuels familiers (individualisme méthodologique en sociologie ou en économie), sans que cela soit nécessaire (tel qu'en géographie). Elle permet,

⁵ Volker Grimm, « Ten Years of Individual-Based Modelling in Ecology: What Have We Learned and What Could We Learn in the Future? », *Ecological Modelling*, n° 115, 1999, p. 129-148.

⁶ Michael Batty, *Cities and Complexity: Understanding Cities with Cellular Automata, Agent-Based Models, and Fractals*, Cambridge (MA), MIT Press, 2005; Lena Sanders, « Les modèles agent en géographie urbaine », dans Frédéric Amblard et Denis Phan (dir.), *op. cit.*, p. 151-168 [traduction anglaise : « Agent Model in Urban Geography », dans Denis Phan et Frédéric Amblard (dir.), *op. cit.*, p. 147-168].

⁷ Leigh Tesfatsion et Kenneth L. Judd, *Handbook of Computational Economics*, vol. 2., *Agent-Based Computational Economics*, Amsterdam, New York, Elsevier North-Holland, 2006.

⁸ Nigel Gilbert et Jim E. Doran (dir.), *Simulating Societies: The Computer Simulation of Social Phenomena*, London, UCL Press, 1994; Nigel Gilbert et Klaus G. Troitzsch, *Simulation for the Social Scientist*, Second edition, Milton Keynes, Open University Press, 2005; Nigel Gilbert, « Sciences sociales computationnelles : simulation sociale multi-agents », dans Frédéric Amblard et Denis Phan (dir.), *op. cit.*, p. 141-160 [traduction anglaise : « Computational Social Sciences: Agent-Based Social Simulation », dans Denis Phan et Frédéric Amblard (dir.), *op. cit.*, p. 115-134]; Gianluca Manzo, « Variables, mécanismes et simulations : une synthèse des trois méthodes est-elle possible? Une analyse critique de la littérature », *Revue française de sociologie*, vol. 46, n° 1, 2005, p. 37-74; Gianluca Manzo, « Progrès et "urgence" de la modélisation en sociologie. Du concept de modèle générateur et de sa mise en œuvre », *L'Année sociologique*, vol. 57, n° 1, 2007, p. 13-61.

⁹ Nigel Gilbert et Rosaria Conte (dir.), *Artificial Societies: The Computer Simulation of Social Life*, London UCL Press, 1995; Joshua M. Epstein et Robert L. Axtell, *Growing Artificial Societies, Social Sciences from the Bottom up*, Washington (DC), Brooking Institution Press, Cambridge (MA), MIT Press, 1996.

¹⁰ Éric Bonabeau, « Intelligence collective? », dans Éric Bonabeau et Guy Theraulaz (dir.), *Intelligence collective*, Paris, Hermes, 1994, p. 13-28.

cependant, de compléter ces cadres conceptuels, en particulier grâce à l'intégration d'éléments relationnels ou organisationnels qui peuvent être formalisés par des graphes sur lesquels les agents interagissent, donnant au système résultant les propriétés dynamiques d'un système complexe adaptatif¹¹. Par rapport aux autres méthodes de modélisation, les SMA peuvent être vus comme « compléments » ou comme « substituts » des formalismes classiques¹², avoir comme objectifs de reproduire des faits stylisés ou des phénomènes observés¹³ ou être fondés sur le couplage de modèles de natures différentes¹⁴.

Les architectures multi-agents permettent d'explicitier la nature des relations entre l'environnement social des agents, d'une part (dispositifs organisationnels, institutionnels, structures relationnelles et spatiales...), et les déterminants individuels de l'action des agents d'autre part, (dimension cognitive et « émotionnelle »). Elles offrent également un cadre adéquat pour poser la question de l'ontologie des « objets sociaux »¹⁵ et des causalités sociales, par exemple à travers les phénomènes émergents¹⁶ qui permettent

¹¹ Gérard Weisbuch, *Dynamique des systèmes complexes : une introduction aux réseaux d'automates*, Paris, InterEditions / CNRS, 1989 [traduction anglaise : *Complex Systems Dynamics*, Santa-Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity, Redwood City, CA Addison-Wesley, 1990].

¹² Robert L. Axtell, *op. cit.*

¹³ Lena Sanders, *op. cit.*

¹⁴ Franck Varenne, *Du modèle à la simulation informatique*, Paris, Vrin, 2007.

¹⁵ Pierre Livet et Ruwen Ogien, « L'enquête ontologique, du mode d'existence des objets sociaux », *Raisons pratiques*, n° 11, Paris, Éditions de l'École des hautes études en sciences sociales, 2000; Pierre Livet et Frédéric Nef, *Les êtres sociaux : processus et virtualité*, Paris, Hermann, 2009.

¹⁶ Jean-Louis Dessalles, Jean-Pierre Müller et Denis Phan, « Emergence in Multi-Agent Systems: Conceptual and Methodological Issues », dans Denis Phan et Frédéric Amblard, *op. cit.*, p. 327-356; Jean-Louis Dessalles, Jacques Ferber et Denis Phan, « Emergence in Multi-Agent Systems: Review of Conceptual and Methodological Issues for the Application to the Social Sciences », dans Ang Yang et Yin Shan (dir.), *Intelligent Complex Adaptive Systems*, Idea Group Inc, 2008, p. 255-299; R. Keith Sawyer, *Social Emergence: Societies as Complex Systems*, Cambridge (MA), Cambridge University Press, 2005; Pierre Livet et Denis Phan, « Ontologie et émergence pour les SHS : suppléments aux notions d'émergence de Bonnabeau, Dessalles et Müller », dans Denis Phan (dir.), *Rochebrune'09 : XVI^e rencontres interdisciplinaires sur les systèmes complexes naturels et artificiels. Ontologie et dynamique des systèmes*

de penser les multiples aspects d'une cognition à la fois individuelle et « sociale »¹⁷. Eptstein¹⁸ qualifie ainsi ces nouvelles approches de « sciences sociales génératives ».

Des ontologies pour la modélisation « multi-agents »

En philosophie, l'ontologie est la science « of what is, of the kinds and structures of objects, properties, events, processes and relations in every area of reality »; dans un sens large, il s'agit de l'étude de « ce qui pourrait exister »¹⁹. Le terme a été récemment réutilisé en informatique dans le sous-domaine de l'intelligence artificielle qui s'intéresse à la représentation des connaissances. Gruber²⁰ définit ainsi l'ontologie comme « une spécification de la conceptualisation d'un domaine (de connaissance) donné ». Une ontologie informatique vise donc (1) la représentation conceptualisée des connaissances d'un domaine, comme (2) la spécification de cette conceptualisation. Le premier point nécessite de choisir une manière de voir et de décrire ce domaine, le second de choisir un langage formel pour procéder à cette description. Il s'agit, en général, d'une caractérisation logique et ensembliste des entités de ce domaine et de leurs relations, dans un langage de description approprié.

Les ontologies se sont d'abord développées dans le domaine de l'organisation des données, comme les systèmes d'information

complexes, Paris, à paraître en 2010.

¹⁷ Cristiano Castelfranchi, « Through the Agents' Minds: Cognitive Mediators of Social Action », *Mind & Society*, vol. 1, n° 1, mars, 2000, p. 109-140; Rosaria Conte et Cristiano Castelfranchi, *Cognitive and Social Action*, London, UCL Press, 1995.

¹⁸ Joshua M. Epstein, *Generative Social Science: Studies in Agent-Based Computational Modeling*, Princeton University Press, 2006, 356 p.

¹⁹ Barry Smith, « Ontology », dans Luciano Floridi (dir.), *Blackwell Guide to the Philosophy of Computing and Information*, Oxford, Blackwell, 2003, p. 155-166.

²⁰ Thomas R. Gruber, « Toward Principles for the Design of Ontologies Used for Knowledge Sharing », dans Nicola Guarino et Roberto Poli (dir.), dans *International Workshop on Formal Ontology*, Padova (Italie), version révisée, mars 1993, disponible comme rapport technique KSL-93-04, Knowledge Systems Laboratory, Stanford University, <http://www-ksl.stanford.edu/knowledge-sharing/papers/onto-design.rtf>.

géographiques (SIG) ou l'informatique documentaire médicale. L'objectif est d'automatiser l'organisation des connaissances, (recueil, classement et consultation...). Dans le monde des SMA, les concepteurs de logiciels ont aussi besoin de réifier les modèles et d'en organiser les principes selon des règles d'organisation structurées et porteuses de sens. L'ingénierie des modèles désigne la face informatique de cette activité. La formulation d'ontologies associées aux modèles conceptuels utilisés en SHS apparaît comme un médiateur – une interface – entre cette face informatique et la face conceptuelle spécifiquement disciplinaire (que l'on qualifiera, dans ce qui suit, de « thématique »).

Comme les modèles conceptuels utilisés dans les SHS proposent un discours sur « ce qui pourrait exister », les entités, les qualités, les relations, les processus utilisés dans ces modèles constituent, explicitement ou implicitement, une ontologie spécifique, que l'on qualifiera de thématique, qui peut être considérée en soi comme un objet d'étude²¹. Si le modèle informatique et le modèle conceptuel concordent (s'il n'y a pas de biais de programmation), tout modèle de simulation basé sur des agents (et plus généralement tout modèle formel) implique en retour un engagement ontologique relativement à la discipline dont relève la thématique où le modèle s'applique. Dans le cadre du projet COSMAGEMS (Corpus d'Ontologies pour les Systèmes Multi-Agents en Géographie, Économie, Marketing et Sociologie), financé par l'ANR, dont cette note expose les principes, nous nous sommes placés au croisement de ces deux approches, ingénierie des modèles et ontologie thématique, en discutant de ce double point de vue de la possibilité d'une médiation – interface – commune aux deux approches, où l'on peut identifier les entités pertinentes (objets, qualités, relations, processus), et les opérations qui peuvent être opérées sur ces entités à l'aide d'un (de) formalisme(s) descriptif(s) simple(s).

Pour exposer la logique de cette démarche, nous considérons dans une première partie une ontologie à la fois (1) comme un élément nécessaire de la démarche de connaissance et (2) comme

²¹ Pierre Livet et Ruwen Ogien, *op. cit.*; Pierre Livet et Frédéric Nef, *op. cit.*

un outil de réification d'un point de vue conceptuel dans la perspective de sa modélisation. Cette approche méthodologique ouverte nous amènera à justifier l'existence (et la persistance) d'une pluralité de points de vue, ce qui nous a amené à maintenir simultanément différentes approches de la représentation ontologique à partir d'un même modèle conceptuel thématique initial pour la modélisation basée sur des agents. Ceci nous conduit donc à rejeter un principe moniste et universel pour organiser les connaissances, qui nous fournirait un « couteau suisse » capable de traiter de tous les cas de figures. Notre conception est plutôt celle de « points de vue » multiples (mais nécessairement croisés en certains points) sur un même domaine objet d'observation²². Ainsi, différents points de vue et éclairages portés sur une scène en photo ou en cinéma font porter l'ombre et la lumière sur des aspects différents, font apparaître ou masquer des éléments ou des relations entre les éléments d'une même scène. Corrélativement, ce choix nous a incité à examiner la question centrale des domaines d'intercompatibilité et des modes d'articulation entre ces différents points de vue à la fois concurrents et complémentaires, qui sont présentés dans une seconde partie.

1. L'ontologie comme élément de la démarche de connaissance et comme outil de réification d'un point de vue conceptuel en vue de sa modélisation

En épistémologie, jusqu'à une période récente (voir le point de vue pragmatique développé plus loin), les modèles ont été traités

²² Pierre Livet, Denis Phan et Lena Sanders, « Why Do We Need Ontology for Agent-Based Models? », dans Klaus Schredelseker et Florian Hauser (dir.), *Complexity and Artificial Markets*, Series Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, n° 614, Berlin, Springer, p. 133-146; Pierre Livet, Jean-Pierre Müller, Denis Phan et Lena Sanders, « Ontology, A Mediator for Agent Based Modeling in Social Science », *JASSS*, vol. 13, n° 1, 2010, <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/13/1/3.html>; Pierre Livet et Lena Sanders, « Le "test ontologique" : un outil de médiation pour la modélisation agent », dans Denis Phan, Rochebrune'09, *op. cit.*; Jean-Pierre Müller, « La notion de cadre conceptuel: penser la place des ontologies dans le processus de modélisation », dans Denis Phan (dir.) *Rochebrune'09, op. cit.*

comme des instruments dérivés des théories et non comme des objets autonomes. Selon le point de vue néo-positiviste (Hempel-Nagel) dit syntaxique (I), un modèle est la reformulation d'une théorie selon le schéma : {système formel, énoncés d'observation, règles d'interprétation}. À partir des années soixante, selon le point de vue sémantique (II), un modèle est une structure d'objets (plus ou moins abstraits) qui est l'une des interprétations possibles d'une théorie²³. Selon la version néo-empiriste de Van Fraassen²⁴, une théorie (1) est ainsi reliée aux données empiriques (2) à travers des modèles (3) qui spécifient les paramètres de cette théorie pour l'appliquer à un domaine particulier. Une théorie peut être ainsi décrite soit par un ensemble de contraintes et de relations sur des ensembles (École de Stanford), soit sur les espaces d'état d'un système dynamique (van Fraassen, Suppes), soit encore sur une structure que devront vérifier les modèles qui permettent de l'interpréter. Ces techniques de description des modèles visent ainsi à abstraire des modèles des principes généraux d'organisation qui donnent du sens à l'activité scientifique. Les travaux impressionnants de Patrick Suppes et des chercheurs de l'école de Stanford ont ainsi débouché sur la constitution de corpus thématiques de modèles couvrant de nombreux domaines de recherche, de la physique à la psychologie en passant par l'économie²⁵. Nous retiendrons de ces travaux la possible pluralité des modèles qui peuvent être proposés pour faire le lien entre des conjectures théoriques et des données issues de l'observation empirique, comme la possibilité de comparer ces modèles à un niveau « méta » grâce à un cadre de référence

²³ C. Ulises Moulines, *La philosophie des sciences : l'invention d'une discipline (fin XIX^e - début XXI^e siècle)*, Paris, Éditions Rue d'Ulm / Presses de l'ENS, 2006.

²⁴ Bas C. van Fraassen, *Scientific Representation: Paradoxes of Perspective*, Oxford, Oxford University Press, 2008.

²⁵ David H. Krantz, R. Duncan Luce, Patrick Suppes et Amos Tversky, *Foundations of Measurement, Vol. I: Additive and Polynomial Representations* (1971), *Vol. II: Geometrical, Threshold, and Probabilistic Representations* (1989), *Vol. III: Representation, Axiomatization, and Invariance* (1990), New York, Academic Press, 1971-1990 [réédition de l'ensemble des 3 ouvrages par Dover Publications Inc., 2009].

générique structurant²⁶. D'un point de vue épistémologique, l'approche « sémantique » est compatible aussi bien avec la posture anti-réaliste de Van Fraassen²⁷ qu'avec des positions réalistes « modérées » comme, par exemple, le « réalisme structurel » inspiré de Poincaré²⁸. Pour l'empirisme constructif du premier, les modèles permettent de « sauver » les phénomènes et l'acceptation d'une théorie implique seulement la croyance en son adéquation empirique et non plus en sa vérité, comme dans l'approche syntaxique²⁹. Les énoncés théoriques apparaissent ainsi non comme le « reflet de la réalité », mais comme des formes de conventions « validées » par la communauté scientifique en raison de leur commodité pour atteindre des objectifs spécifiés. Si l'on adopte, au contraire, un point de vue réaliste modéré, l'efficacité de la démarche scientifique peut s'expliquer par l'argument du réalisme structurel : les croyances et les conventions jugées « valides » par la communauté scientifique ne sont pas arbitraires (relativisme) car l'efficacité des énoncés scientifiques dépend de leur plus ou moins grande adéquation entre la structure des théories et la structure des phénomènes empiriques dont ces théories cherchent à rendre compte. En sciences sociales, c'est par exemple la position adoptée par Livet et Nef³⁰. Selon ces deux points de vue (anti-réaliste et réaliste modéré), la comparaison des énoncés renvoie alors à leur consistance (d'un point de vue interne) et à l'accord intersubjectif de la communauté sur leur capacité à « sauver les phénomènes » (d'un point de vue externe). Seul le second critère diffère, selon que l'on défend une position réaliste (modéré), ou anti-réaliste. Selon Walliser *et al.*³¹, la connaissance scientifique peut ainsi être vue comme un système de

²⁶ Pierre Livet, Jean-Pierre Müller, Denis Phan et Lena Sanders, *op. cit.*; Pierre Livet et Lena Sanders, *op. cit.*

²⁷ Bas C. van Fraassen, *The Scientific Image*, Oxford, Oxford University Press, 1980; Bas C. van Fraassen, *Scientific Representation*, *op. cit.*

²⁸ Hervé P. Zwirn, *Les limites de la connaissance*, Paris, Odile Jacob, 2000.

²⁹ Bas C. van Fraassen, *The Scientific Image*, *op. cit.*

³⁰ Pierre Livet et Frédéric Nef, *op. cit.*

³¹ Bernard Walliser, Denis Zwirn et Hervé Zwirn, « Raisonnements non certains et changement de croyances », dans Thierry Martin, (dir.), *Probabilités subjectives et rationalité de l'action*, Éditions du CNRS, 2003, p. 47-66.

croissance que l'on révisé à l'épreuve des phénomènes empiriques en cherchant à maintenir la cohérence d'ensemble et à préserver les croyances qui sont les plus profondément ancrées. Cette variante de la « maxime de mutilation minimale » de Quine³² se retrouve dans l'épistémologie de la simulation proposée par Livet³³ avec sa hiérarchie de « mises en suspension » (c'est-à-dire qu'il existe des niveaux de croyances plus profondément ancrés que les autres que l'on cherche au moins temporairement à protéger d'une révision). Sur cette base, nous considérons davantage les ontologies pour SMA en SHS comme renvoyant à une pratique disciplinaire légitimée qu'à une quelconque nécessité métaphysique.

En pratique, en effet, les modèles utilisés dans les sciences de la nature comme dans les sciences sociales (y compris en économie) ont souvent été construits pour répondre à une question en l'absence d'une théorie préalable ou à partir d'éléments théoriques partiels. Les modèles sont alors des constructions conceptuelles basées sur des observations ou des questions empiriques³⁴. Selon le point de vue pragmatique (III) sur les modèles³⁵, ceux-ci sont perçus comme des « médiateurs autonomes » entre théories, pratiques et données de l'expérience, construits pour répondre à une problématique spécifique. La définition de Minsky³⁶ souvent utilisée en informatique en est un bon exemple : « Pour un

³² Willard Van Orman Quine, *Methods of Logic*, Second Edition, Cambridge (MA), Harvard University Press, 1950 [traduction française, Maurice Clavelin, *Méthodes de Logique*, Paris, Armand Colin, 1972].

³³ Pierre Livet, « Essai d'épistémologie de la simulation multi-agents en sciences sociales » dans Frédéric Amblard et Denis Phan (dir.), *op. cit.*, p. 193-218 [traduction anglaise : « Towards an Epistemology of Multi-Agent Simulation in Social Science », dans Denis Phan et Frédéric Amblard, *op. cit.*, p. 169-193].

³⁴ Anne-Françoise Schmid, *L'âge de l'épistémologie*, Paris, Kimé, 1998; Denis Phan, Anne-Françoise Schmid et Franck Varenne, référence en français [traduction anglaise : « Epistemology in a Nutshell: Theory, Model, Simulation and Experiment », dans Denis Phan et Frédéric Amblard, *op. cit.*, p. 357-392].

³⁵ Mary S. Morgan et Margaret Morrison, *Models as Mediators*, Cambridge (MA), Cambridge University Press, 1999.

³⁶ Marvin L. Minsky, « Matter, Mind and Models », *Proceedings of IFIP Congress*, 1965, p. 45-49.

observateur B, un objet A^* est un modèle d'un objet A dans la mesure où B peut utiliser A^* pour répondre aux questions qu'il se pose sur A ». Dans le cadre de ses pratiques sociales (c'est-à-dire cadre académique), un chercheur possède donc un domaine empirique d'intérêt A (objet de ses investigations) et une question B concernant ce domaine et dérivée de ses pratiques. Pour répondre à la question B, la modélisation inclut un processus d'abstraction du domaine empirique A vers un modèle construit artificiellement A^* , avec l'idée que les entités abstraites et les relations qui structurent le modèle A^* sont « suffisantes » pour répondre à la question B sur A. La justification de la pluralité des modèles renvoie alors plus à une question de pratique qu'à une question d'interprétation (comme avec le point de vue « sémantique »). Plus spécifiquement, l'interprétation ne peut être détachée de la pratique au sens où l'entendait Wittgenstein, ce qui fait dire à Sandra Laugier que « l'interprétation, c'est l'action même »³⁷.

Nous désignerons donc par « point de vue » le regard porté sur un domaine de connaissance dans un contexte défini par un objectif et des pratiques (scientifiques) spécifiques. La construction de modèles visant à répondre à des questions dans un cadre donné s'inscrit donc à la croisée de trois « mondes »³⁸. Ceux-ci sont représentés à la figure 1.

Notre premier monde, en bas à droite de la figure 1 est le domaine empirique thématique. Les informations issues des phénomènes observés y sont structurées relativement à un domaine thématique d'intérêt particulier. Ainsi, le domaine d'objet du géographe sera organisé autour de relations spatiales, celui du sociologue autour de relations sociales et celui de l'économiste autour de relations économiques. Ceci signifie que tous les éléments et toutes les relations observables des phénomènes du « monde réel » ne seront pas nécessairement pris en compte. Mais ceci ne signifie pas que seuls les éléments et les

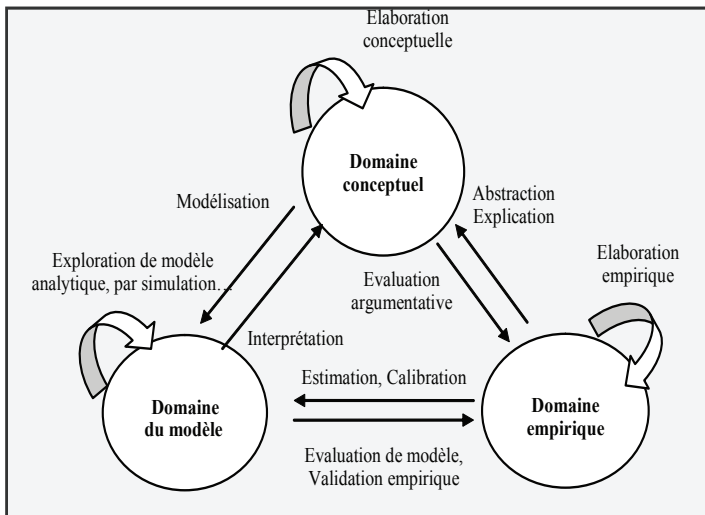
³⁷ Je remercie Franck Varenne de nous avoir présenté cet aphorisme.

³⁸ Pierre Livet, Jean-Pierre Müller, Denis Phan et Lena Sanders, *op. cit.*; Jean-Pierre Müller, *op. cit.*

relations d'intérêt du champ disciplinaire sont mobilisés. D'autres éléments et relations seront pris en compte s'ils sont jugés pertinents par rapport au domaine d'objet de la discipline considérée. Dans ce monde, on privilégie l'observation, le relevé et le traitement des données, le repérage des régularités et des similitudes (classification, catégorisation, statistiques, etc.). Le domaine empirique est donc celui des observations et des mesures. Il dépend des pratiques d'observation (expérimentation, récolte des données, entrevues, etc.) et de la vision sous-jacente du thématicien définissant l'objet et les modalités de mise en œuvre de ces observations et mesures. La flèche réflexive qui part de ce domaine pour y revenir désigne l'activité d'élaboration empirique, par laquelle on cherche en permanence à améliorer le contenu factuel, mais aussi conceptuel de nos connaissances empiriques, aussi bien que l'organisation de ces informations.

Figure 1

Domaines et pratiques de la connaissance



(Source : Pierre Livet *et al.*, *op. cit.* et Jean Pierre Müller, *op. cit.* : <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/13/1/3.html>)

L'activité de ce domaine n'est pas indépendante de celle du domaine conceptuel. D'un côté, elle peut aller jusqu'à l'établissement de faits stylisés ou à la formation de conjectures théoriques. D'un autre côté, l'établissement des « faits » ou l'élaboration de descriptions organisées ne sont pas indépendants de nos cadres d'arrière plan. En effet, nos perceptions comme nos expériences doivent être rattachées à ces cadres conceptuels qui agissent comme un « filtre » au niveau de l'interprétation : les « faits » sont en partie des construits cognitifs, théoriques ou sociaux³⁹. C'est la thèse de la surdétermination des faits par les théories : pour Hanson⁴⁰, les faits sont toujours construits et « chargés de théorie »; leur « mise en forme » est un moment nécessaire de la découverte, nécessaire à leur intelligibilité.

Le second monde est le domaine de la conceptualisation. Il s'agit d'identifier les facteurs pertinents qui interviennent sur le phénomène auquel on s'intéresse et qui peuvent être des candidats explicatifs pour rendre compte de sa genèse, de sa configuration ou de sa dynamique. La construction d'un cadre conceptuel portant sur un domaine d'objets particulier détermine les opérations sur les objets et les qualités de ce domaine, comme les relations et les opérations qui les lient, au moyen desquels les conjectures explicatives proposées (ou « modèle conceptuel ») ont du sens. L'exploration du domaine conceptuel peut amener à des généralisations ou à des spécialisations, dont les résultats peuvent être évalués en regard des observations du domaine empirique, mais contribuent aussi à structurer ce dernier (cadres d'arrière plan). C'est dans le domaine conceptuel que l'on doit chercher la signification des entités, relations et opérations formalisées dans le domaine du modèle, tout comme celle des résultats de

³⁹ Voir, par exemple, en économie, Oskar Morgenstern, *On Accuracy of Economic Behavior*, Princeton (NJ), Princeton University Press, 1950 [traduction française, *Précision et incertitude des données économiques*, Paris, Dunod, 1972] ou François Fourquet, *Les comptes de la puissance. Histoire de la comptabilité nationale et du Plan*, Paris, Encres, 1980, pour les origines de la comptabilité nationale.

⁴⁰ Norwood Hanson, *Russell Patterns of Discovery*, Cambridge (MA), Cambridge University Press, 1958 [traduction française, *Les Modèles de la découverte*, Dianoia, 2000].

l'exploration de ces modèles formels (par exemple, les traces d'exécution d'une simulation).

Le domaine du modèle comprend la formalisation/l'implémentation d'un modèle conceptuel au moyen d'un système formel (mathématique ou informatique, tels que les équations différentielles, les automates cellulaires, les SMA, etc.). Le domaine du modèle est donc une interface entre le système formel et le modèle conceptuel qu'il est sensé formaliser. Pratiquement, le modélisateur a toujours à l'esprit l'aspect sémantique du modèle, mais celui-ci doit être vu comme une spécification particulière du domaine conceptuel. En spécifiant les relations génériques du domaine conceptuel, le modèle formel permet l'exploration syntaxique (analytiquement ou par simulation) des propriétés de cette formalisation du modèle. Ceci permet d'en percevoir la cohérence interne et la robustesse, mais non d'en inférer la validité (ou l'invalidité) pour d'autres formalisations possibles de ce même modèle conceptuel. En d'autres termes, on ne peut (logiquement) pas déduire des propriétés particulières d'un modèle (formel) des propositions générales valables pour le modèle conceptuel qui l'a inspiré. Par contre, on a toujours besoin de remonter au modèle conceptuel pour donner du sens aux résultats de l'exploration formelle. Enfin, pour réduire le champ des possibles, il est courant de calibrer les paramètres d'un modèle de simulation à partir de faits observés, par expertise ou estimation statistique, surtout lorsqu'il s'agit de reproduire des phénomènes observés. Dans ce dernier cas, on se sert aussi des résultats de simulation pour évaluer la « validité » d'un modèle, sachant que cette démarche inductive est à considérer avec la même prudence que l'induction du modèle formel vers le modèle conceptuel⁴¹.

La plupart du temps, les ontologies sous-jacentes à ces trois domaines ne sont pas explicitées; de plus, il n'y a pas de raison

⁴¹ Frédéric Amblard, Juliette Rouchier et Pierre Bommel, « Évaluation et validation de modèles multi-agents », dans Frédéric Amblard et Denis Phan, *op. cit.*, p. 103-120 [traduction anglaise : « Assessment and Validation of Multi-Agent Model », dans Denis Phan et Frédéric Amblard, *op. cit.*, p. 93-114].

de penser que ces ontologies soient nécessairement cohérentes entre elles. Il est donc important de rendre explicites les ontologies dans chaque domaine et, si possible, d'en assurer l'articulation de manière cohérente. Pierre Livet⁴² a proposé la notion de « test ontologique » pour évaluer le degré de similitude ou de différence entre des ontologies diverses sensées rendre compte du même domaine d'objet. La construction d'une représentation schématique, mais formalisée, de l'ontologie d'un modèle conceptuel candidat à un processus de modélisation formel en vue d'une implémentation informatique sous forme de SMA est un exercice qui va dans le sens d'une telle explicitation, particulièrement nécessaire s'il y a une possible pluralité de points de vues autour du même modèle conceptuel de référence. Dans ce but, nous allons utiliser maintenant à titre d'illustration des éléments du formalisme UML (Unified Modeling Language)⁴³.

2. Différentes approches de la représentation ontologique pour la modélisation basée sur des agents

L'émergence est une propriété centrale des systèmes dynamiques fondés sur des agents en interaction. L'interaction entre les éléments du système conduit souvent à l'émergence d'un « ordre » (structure, organisation...). Mais celui-ci doit encore être identifié comme tel par un observateur. Ainsi Atlan⁴⁴ définit-il la complexité comme « un ordre dont on ignore le code », et l'on définit parfois un système complexe par ses propriétés globales « que l'on ne saurait prédire par la seule connaissance des règles qui gouvernent les éléments qui le composent ». L'émergence est un sujet technique lui-même complexe que l'on ne saurait traiter en peu de mots⁴⁵, mais son intégration dans un cadre ontologique

⁴² Pierre Livet, Jean-Pierre Müller, Denis Phan et Lena Sanders, *op. cit.*; Pierre Livet et Lena Sanders, *op. cit.*

⁴³ Pierre Bommel et Jean-Pierre Müller, référence en français, [traduction anglaise : « An Introduction to UML for Modelling in the Human and Social Science », dans Denis Phan et Frédéric Amblard, *op. cit.*, p. 273-294].

⁴⁴ Henri Atlan, *Entre le cristal et la fumée, essai sur l'organisation du vivant*, Paris, Seuil, [1979] 1986.

⁴⁵ Voir, par exemple, Jean-Louis Dessalles, Jean-Pierre Müller et Denis Phan, *op. cit.*; Jean-Louis Dessalles, Jacques Ferber et Denis Phan, *op. cit.*, pour une

apparaît éclairante pour les SHS.

2.1. Modèle de Schelling

Un des premiers exemples d'émergence fondée sur des interactions sociales peut être trouvé dans les modèles de ségrégation de Schelling publiés en 1969 et 1971 et repris dans son ouvrage *Micromotives and Macrobehaviour*⁴⁶. Bien que Schelling nous ait proposé une expérience de pensée basée sur les déplacements de pions sur un échiquier, ce modèle est rapidement devenu paradigmatique pour la communauté multi-agents en sciences sociales et il a fait l'objet de multiples implémentations⁴⁷. Nous nous en sommes donc servis comme d'un cadre de référence pour croiser des points de vues interdisciplinaires (économie, géographie, sociologie) sur un domaine d'objet partagé, d'un point de vue ontologique.

Au niveau conceptuel, on peut énoncer la conjecture de Schelling de la manière suivante : la persistance de la ségrégation raciale dans le logement pourrait être expliquée par un ensemble limité de facteurs causaux locaux (de simples préférences des agents sur leur voisinage), sans qu'il soit besoin de faire référence à des déterminants intentionnel macro sociaux.

Dans le modèle de Schelling, les agents n'interagissent que localement, avec leurs huit voisins immédiats. Ils ne sont pas informés sur la configuration générale de l'habitat. Les préférences des agents sont compatibles avec une structure régulièrement intégrée des populations (damier, où blancs et noirs alternent) et

revue des aspects les plus techniques et R. Keith Sawyer, *op. cit.*, pour une discussion des implications dans les SHS.

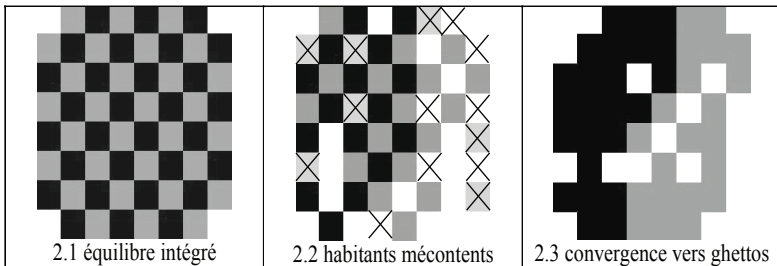
⁴⁶ Thomas C. Schelling, « Models of Segregation », *American Economic Review*, vol. 59, n° 2, p. 488-493 et « Dynamic Models of Segregation », *Journal of Mathematical Sociology*, 1, p. 143-186; Thomas C. Schelling, *Micromotives and Macrobehaviour*, New York, Norton and Co., 1978 [traduction française : *La tyrannie des petites décisions*, Paris, PUF, 1980 (réédition Dunod, 2007)].

⁴⁷ Voir, par exemple, Éric Daude et Patrice Langlois, « Comparaison de trois implémentations du modèle de Schelling », dans Frédéric Amblard et Denis Phan, *op. cit.*, p. 411-441 [traduction anglaise : « Comparisons of Three Implementations of Schelling's Spatial Segregation Model », dans Denis Phan et Frédéric Amblard, *op. cit.*, p. 295-326].

ceux-ci acceptent même d’habiter avec un voisinage majoritairement différent, sauf s’ils deviennent trop minoritaires : il doivent avoir au moins 37,5 % de voisins semblables. Par exemple, selon la règle proposée par Schelling, un agent qui a de six à huit voisin doit en avoir au moins trois semblables (acceptation de 50 %, 57,1 %, 62,5 % de voisins différents, respectivement). Schelling dispose, sans remplir les coins, 60 habitants, 30 “rouges” et 30 “noirs” sur un damier 8 x 8. Il part d’une situation où les habitants sont disposés alternativement, les habitants ont donc exactement quatre voisins rouges et quatre noirs à partir de n’importe quelle position au delà de la rangée de bordure (Figure 2.1). Cette configuration d’intégration maximale est un équilibre, puisque aucun habitant ne souhaite déménager.

Figure 2

Un exemple inspiré du modèle initial de Schelling⁴⁸



Source : <http://www.gemas.msh-paris.fr/dphan/complexe/schelling.html>

Schelling enlève 20 habitants et en rajoute 5 au hasard. Les habitants mécontents de leur voisinage apparaissent barrés d’une croix (Figure 2.2). Les habitants mécontents déménagent en cherchant au hasard une localisation conforme à leurs vœux. Ces déplacements engendrent de nouveaux mécontentements et la population continue à bouger jusqu’à ce qu’un nouvel équilibre

⁴⁸ Source : initialement applet java sur le web <http://www.gemas.msh-paris.fr/dphan/complexe/schelling.html> porté sur Moduleco vers 2002, voir Denis Phan, « From Agent-Based Computational Economics towards Cognitive Economics », dans Paul Bourguine et Jean-Pierre Nadal (dir.), *Cognitive Economics*, Springer Verlag, 2004, p. 371-398.

soit atteint (Figure 2.3). À la suite d'une telle perturbation aléatoire, les interactions locales suffisent pour faire apparaître des configurations globales fortement homogènes : la ségrégation est une propriété émergente du modèle. Cependant certaines configurations locales intégrées – des îlots, par exemple – peuvent être résistantes aux perturbations extérieures.

Dans ce modèle, la formation de ghettos est le résultat non intentionnel de la composition des comportements individuels. L'intention des agents est de ne pas être trop « isolés » de leurs semblables, non de créer une nouvelle organisation de l'espace. Une telle structure est dite « émergente », car elle ne figure pas dans l'espace des choix des agents préalablement à sa formation. Elle n'est la conséquence du comportement de personne en particulier, mais tous y contribuent directement ou indirectement, par effet de « composition ».

Quelles sont les entités et les relations pertinentes pour modéliser la conjecture de Schelling? Un premier essai d'ontologie UML du modèle initial de Schelling, proposé par Christophe Sibertin Blanc⁴⁹ est présenté à la figure 3. Pour illustrer notre propos, nous avons choisi délibérément la première tentative, avant discussion par le groupe. Les schémas ontologiques sont ainsi aussi des médiateurs entre chercheurs dans le travail interdisciplinaire. Les figures 4 et 5 proposent un schéma légèrement différent. À la figure 3, on trouve d'abord un espace géographique organisé selon un principe permettant le repérage d'un élément de l'espace (principe d'organisation interne). Il pourrait s'agir d'un échiquier pour Schelling, mais d'autres structures fonctionnent aussi⁵⁰. Pour une ontologie « à gros grains » on peut rester générique, sans spécifier la nature de ce repérage dans l'espace. L'espace ainsi défini est composé d'emplacements (relation avec losange reliant espace et emplacement). Cette relation de composition est spécifiée comme une relation de rattachement des

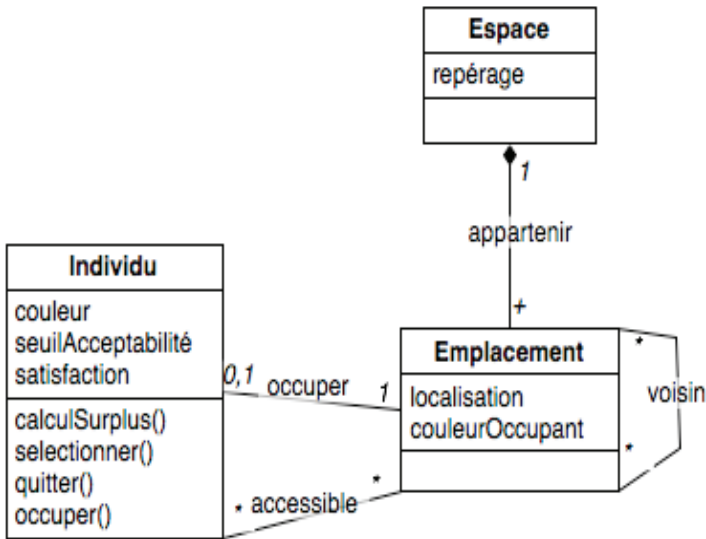
⁴⁹ Denis Phan *et al.*, « Qu'est-ce qu'une ontologie? Comment procéder? L'exemple de la ségrégation spatiale », dans Denis Phan (dir.), *Ontologies pour la modélisation multi-agents en sciences humaines et sociales*, à paraître en 2010.

⁵⁰ Voir, par exemple, Éric Daude et Patrice Langlois, *op. cit.*

parties à un tout : un emplacement appartient à une espèce. Les emplacements ont comme attribut de pouvoir être localisés dans leur espace d'appartenance. Les emplacements sont liés entre eux par une relation de voisinage. Celle-ci peut être déterminée localement par un opérateur de distance entre emplacement (figure 3). Le voisinage peut être défini entre extension (ici la relation voisin) ou en compréhension (une fonction d'emplacement qui retourne l'ensemble des voisins).

Figure 3

Essai d'ontologie UML du modèle initial de Schelling



Source : Atelier COSMAGEMS, Christophe Sibertin Blanc pour (Phan et al., op. cit.)

Une autre option pourrait être de définir une entité « voisinage » (figure 4), ce qui suppose de construire cette notion réifiée de voisinage (qui n'est pas une notion première) à partir des relations entre emplacements et entre ces derniers et leurs occupants. Si la construction de la relation de voisinage est similaire dans les deux options, il ne s'agit que d'une option d'implémentation neutre relativement au résultat d'une simila-

tion. Mais la seconde option pourrait aussi contenir d'autres relations plus complexes, comme la représentation que les agents peuvent se faire de leur voisinage, qui pourrait différer de sa configuration effective. Dans ce cas, les résultats peuvent différer (il s'agit d'un autre modèle). De plus, la portée sémantique est différente. À la figure 3, le voisinage est défini pour un emplacement et donc indépendamment des agents : deux individus qui occupent le même emplacement (à des instants différents) ont les mêmes voisins. On pourrait ainsi considérer que chaque individu calcule son « voisinage » en fonction de l'emplacement où il se trouve, alors qu'à la figure 4, il s'agit d'une entité en soi qui comprend à la fois des agents et des emplacements.

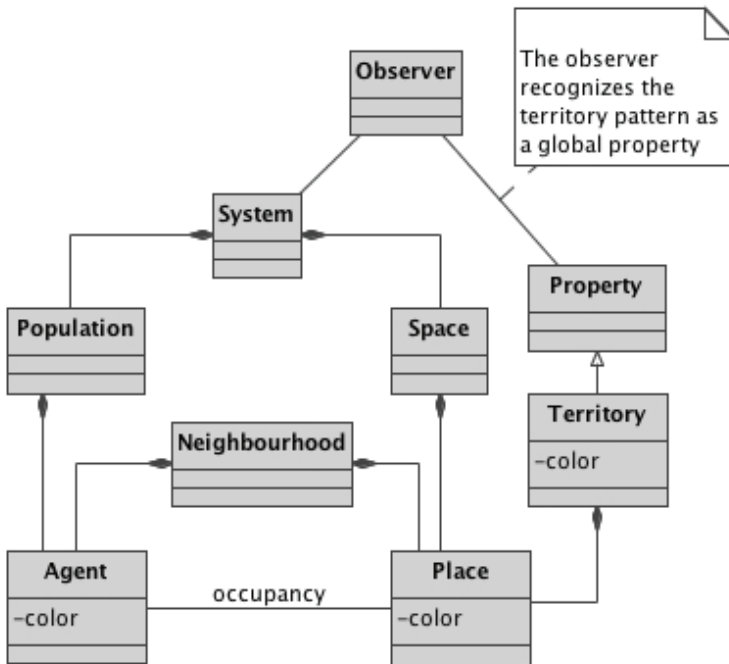
Enfin, nous avons des agents « individués » car identifiables par des attributs (en particulier leur couleur, leur seuil d'acceptabilité – relativement à la composition de leur voisinage – et un état binaire de satisfaction qui résulte d'une opération sur leurs préférences : {content, mécontent}). Ces agents ont deux actions primaires possibles : quitter ou occuper un emplacement. Ils sont donc liés aux emplacements par deux opérations : ils peuvent quitter un emplacement et aller en occuper un autre (activation / désactivation d'une relation binaire {0, 1} d'occupation entre un agent et un emplacement), si celui-ci est accessible (relation d'accessibilité). Cette dernière opération suggère que les emplacements sont dotés d'un attribut interne (non représenté) : occupé (inaccessible) ou non occupé (accessible) qui permet d'activer la relation d'accessibilité. Il doivent alors sélectionner d'une manière ou d'une autre (non représentée ici pour rester générique) un nouvel emplacement à occuper. L'action des agents est déclenchée par un opérateur de préférence (calculSurplus) qui suppose qu'ils aient un accès à une information sur leur voisinage qui n'est pas explicitement représentée à la figure 3.

La figure 4 propose une « ontologie à gros grains » en ce sens qu'elle énumère juste les entités pertinentes et leurs relations, sans spécifier, par exemple, les attributs et/ou les opérateurs des entités comme à la figure 3. Par rapport à cette dernière, elle est donc compatible avec une classe plus large de modèles (on dira

qu'elle est sous-spécifiée). Corrélativement, « l'engagement ontologique », c'est-à-dire les conséquences conceptuelles pour la discipline concernée, est moins fort, mais il est moins proche de l'implémentation du fait de sa sous-spécification. Utiliser un tel diagramme relève d'une pratique (une médiation) différente dans le dialogue informaticien-thématicien, moins engageante, mais aussi moins opératoire. Jean-Pierre Müller parle à ce sujet de « modélisation du discours » plutôt que de « méta-modèle » (la figure 3 est plutôt un essai de méta-modèle). La figure 4 relève d'une approche plus « systémique » que la précédente. Elle présente explicitement deux systèmes couplés : le système simulé et le système d'observation (expérimentateur-thématicien).

Figure 4

Détermination locale des décisions



(Source : Livet et al., op. cit., <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/13/1/3.html>).

Cette approche est compatible avec les propositions avancées par Livet et Nef⁵¹ sur l'interdépendance relative entre les processus sociaux et les processus d'observation des processus sociaux (dont l'activité du sociologue). Le système simulé est défini comme tel : il est composé de deux entités, une population et un espace. Ces macro-entités sont elles-mêmes composées d'agents pour la première et d'emplacements pour la seconde. La relation topographique sur l'espace n'est pas spécifiée en tant que telle, mais une méso-entité lie les agents et les places : il s'agit du « voisinage ». Ceci suggère que la relation de « voisinage » est réifiée dans un objet (social) qui est plus qu'un ensemble de relations, une forme qui « fusionne » les voisins avec leurs emplacements perçus comme éléments de ce « voisinage » un peu à la manière des clés d'une même maison réunies par un anneau sous la forme d'un trousseau, selon une analogie proposée par Pierre Livet. Ontologiquement cette hypothèse est assez forte et implique un engagement ontologique qui ne figure pas, au moins explicitement, dans le modèle initial de Schelling. Nous reviendrons plus loin sur l'une des potentialités ouvertes par une telle réification. La seconde différence avec les relations de la figure 3 est anecdotique : on peut se servir de la relation d'occupation pour déterminer si un emplacement est libre ou non (mais il ne s'agit alors que de la relation d'occupation d'un autre agent). La figure 4 comprend également une représentation du système d'observation de la simulation. Dans le modèle de Schelling, le « territoire » est une entité dotée de propriétés particulières (clusters ou ghettos) qui sont produites par le modèle (le système) mais qui ne sont pas des attributs de ce dernier : ce sont des propriétés « émergentes » qui ne sont reconnues que par l'observateur-expérimentateur. À aucun moment les agents du modèle n'ont connaissance ou conscience de la formation de ces agrégats qui ne figurent pas dans les entités, les relations, les attributs ou les opérations internes au système. Produire des ghettos sans que les agents en aient conscience est d'ailleurs une des propriétés remarquables de ce modèle.

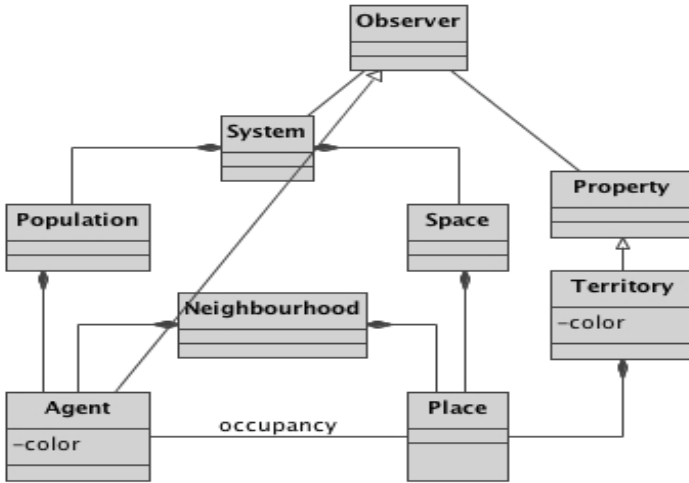
⁵¹ Pierre Livet et Frédéric Nef, *op. cit.*

La figure 5 nous donne une idée de ce que pourrait être un modèle « culturaliste » qui conserverait cependant une détermination « individu-centrée » des phénomènes. La seule différence avec la figure 4 est que l'agent est maintenant un observateur des propriétés globales du système (relation d'héritage en diagonale entre l'observateur et l'agent). En terminologie SHS, l'agent est devenu « réflexif » et ceci peut modifier durablement la dynamique du système, puisque le processus d'observation est maintenant couplé au processus observé. On parle alors d'émergence forte relative⁵². Dans ce cas de figure, la propriété qui caractérise le territoire peut subsumer l'observation effective du voisinage, ce qui aura pour conséquence d'introduire des effets de cliquets qui viennent stabiliser la structure subsumée (ici la ghettoïsation du voisinage). Dans les termes de Pierre Livet, ceci revient à « mettre en suspension » l'observation effective du processus local au profit d'une induction à partir d'informations indirectes sur le processus global. En d'autres termes, on ne procède plus à une observation directe (elle est donc « mise en suspension ») pour s'en tenir à une information indirecte. La croyance en la fiabilité de cette information directe est une croyance de second niveau, bien « ancrée », mais dont la remise en cause conduirait à revenir à l'observation directe. Il s'agit d'un phénomène cognitif et social très répandu. Mais nous ne sommes déjà plus dans le modèle de Schelling, mais bien au-delà. Si ce dernier permet d'expliquer l'émergence de ghettos sans faire d'hypothèse culturaliste, les conditions d'émergence d'un phénomène social différent souvent des conditions de stabilisation (de reproduction) de ce dernier. C'est ce que nous avons cherché à discuter en nous appuyant sur quelques variantes de schémas ontologiques.

⁵² Voir Pierre Livet et Denis Phan, *op. cit.* Il s'agit, en fait, de la notion « d'émergence forte au sens de Müller » définie dans Dessalles *et al.*, *op. cit.*, complétée par les contributions de Franck Varenne (relatives à un système) et de Pierre Livet.

Figure 5

Modèle «culturaliste»



(Source : Livet, et al., op. cit., <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/13/1/3.html>)

Une autre manière de discuter de la structure ontologique d'un modèle multi-agents consiste à utiliser une représentation heuristique basée sur des « quadrants », initialement proposés par Wilber⁵³ et appliquée par Ferber⁵⁴ aux SMA. Les quadrants décomposent un système selon deux axes : intérieur/extérieur et individuel/collectif. Ce second axe oppose les entités individuelles (l'agent) au collectif (la société d'agents) d'un SMA. Le premier axe oppose le point de vue « intérieur », qui correspond à l'architecture des agents, connue par le modélisateur / développeur des agents, mais non observable par l'expérimentateur (sauf à produire des traces des états internes) et un point de vue extérieur qui correspond à celui d'un observateur. Lorsque l'on croise ces deux axes, on obtient le tableau suivant composé de quatre quadrants. Individuel-Intérieur (I-I), Individuel-Extérieur (I-E), Collectif-Intérieur (C-I), Collectif-Extérieur (C-E).

⁵³ Ken Wilber, *Integral Psychology: Consciousness, Spirit, Psychology, Therapy*, Boston (MA), Shambhala, 2000.

⁵⁴ Jacques Ferber, op. cit.

<p>Individuel / Intérieur I-I (<i>subjectif</i>)</p> <p>< Attributs internes : i.e. croyances, désirs, intentions, préférences, émotions...> « Intériorité »</p>	<p>Individuel / Extérieur I-E (<i>Objectif</i>)</p> <p>< Comportement, posture, pratique, processus individuels observables > « action / objet »</p>
<p>Collectif / Intérieur C-I (<i>inter - subjectif</i>)</p> <p><croyances partagées, sens, culture, codes sociaux implicites et conventions...> « noosphère / culture»</p>	<p>Collectif / Extérieur C-E (<i>inter - objectif</i>)</p> <p><faits sociaux objectivés; signe, usages, normes, réseaux sociaux, organisations, institutions...> « structures sociales »</p>

Source : d'après Ferber « Introduction aux concepts et méthodologies de conception multi-agents » *op. cit.*

Du point de vue de la modélisation objet/agent, cette représentation « intégrale » d'un SMA peut être vue comme consubstantielle à ce paradigme de programmation : par construction, un objet a des attributs et des méthodes internes et se trouve plongé dans un environnement externe. Il appartient par ailleurs à un ou à des ensembles plus vastes définissables selon le même principe. Pour les SHS, cette utilisation ne va pas de soi car elle nous situe directement au cœur de vieux débats comme : individualisme versus holisme méthodologique, ou encore la question de l'autonomie du sujet versus l'individuation ou le « mythe de l'intériorité », etc. Un intérêt d'utiliser cette distinction, mais nécessaire au développement informatique orienté agent, réside précisément dans sa nature problématique qui amène une réflexion sur l'affectation dans ce cadre contraignant de notions par nature pluridimensionnelles, comme les « faits sociaux », les « normes », les « institutions » (qui sont en fait en position d'interface entre « l'intérieur » et « l'extérieur »).

Si l'on applique ce cadre au modèle initial de Schelling, on remarque d'abord que l'on n'a pas besoin du cadre (C-I). En effet, le « collectif » social de ce modèle n'est autre chose que l'ensemble des agents qui le composent, liés entre eux par une relation de voisinage objective. Les agents n'ont aucune représentation sociale et le cadre institutionnel est réduit à la simple règle que

l'on ne peut occuper un emplacement que si un autre agent n'y est pas déjà, ce qui ne suppose même pas l'existence d'un droit de propriété. Nous avons vu que la parcimonie est l'une des forces de ce modèle, qui produit des résultats avec un minimum d'hypothèses. Donc, le cadre I-I correspond aux préférences des agents sur leur voisinage, I-E à leur décision d'occuper un emplacement ou de déménager et C-E à l'identification de son voisinage par un agent (point de vue de l'agent) et à l'indentification de clusters (ghettos) par l'observateur-expérimentateur. Pour que le remplissage du quadrant C-I ait du sens, il faudrait que les agents aient par exemple des croyances partagées sur leur voisinage et qu'il y ait un sens de les réifier plutôt que de se limiter à représenter ces croyances dans le quadrant I-I. Ceci pourrait être le cas si le modélisateur-thématicien voulait rendre compte d'une situation où les agents subsument leur voisinage effectif sous une notion « culturelle » générique : territoire ou quartier (c'est-à-dire que la notion localisée et personnalisable de « voisinage » est ramenée à une notion culturelle plus générale qui s'y substitue : mes voisins ne sont pas X ou Y mais « ceux qui habitent mon « quartier »). Dans ce cas, il peut y avoir déconnexion durable entre la représentation ainsi réifiée et la « réalité du terrain » (ici la répartition effective des agents dans un voisinage donné). Dans la vie sociale, on observe de nombreux exemples où des réputations territoriales largement partagées par les individus perdurent alors même que la composition effective de la population du quartier considéré a évolué. Dans ce cas, comme dans celui du monde des modèles, les paramètres pertinents ne sont plus alors ceux de la répartition effective de la population, mais ceux des croyances des agents sur cette répartition. La réification de ces croyances par le modélisateur est légitime dès lors que la communication entre agents permet la reproduction de ces croyances au delà du cercle des agents qui en auraient été initialement porteurs en l'absence d'une telle communication. En d'autres termes, la communication entre agents permet de passer d'un phénomène émergent à un phénomène social (au moins temporairement ou relativement) autonome en ce que celui-ci peut

continuer à se produire dans la vie sociale indépendamment de la participation des agents qui ont initialement contribué à son émergence (c'est plus généralement le cas de tous les « objets sociaux » étudiés, par exemple, par Searle⁵⁵, qui, comme la monnaie, ont une forme d'existence à la fois dans CE et dans CI).

Conclusion

Les diagrammes ontologiques que l'on peut construire autour d'un modèle multi-agents ou plus généralement lors du passage d'un modèle conceptuel à un modèle formel sont des objets utiles selon de nombreux points de vue. Ce sont des aides à la modélisation qui permettent d'évacuer les ambiguïtés du discours (avec les limitations que cela entraîne) pour le rendre programmable au moyen d'un système formel. Ce sont aussi des médiateurs entre les chercheurs concernés par un processus pluridisciplinaire de modélisation. Ce sont encore des benchmarks pour comparer des modèles et des outils heuristiques pour approfondir les questions ontologiques qui sont au cœur des disciplines SHS, mais qui sont souvent volontairement ou non « cachées sous le tapis » pour éviter les sujets problématiques.

Bibliographie

Amblard, Frédéric et Denis Phan (dir.), *Modélisation et simulation multi-agents, applications pour les sciences de l'homme et de la société*, Londres, Hermes-Sciences & Lavoisier, 2006, [traduction anglaise : *Agent-Based Modelling and Simulation in the Social and Human Sciences*, Oxford, The Bardwell Press, 2007].

Amblard, Frédéric, Juliette Rouchier et Pierre Bommel, « Évaluation et validation de modèles multi-agents », dans Frédéric Amblard et Denis Phan (dir.), *Modélisation et simulation multi-agents, applications pour*

⁵⁵ John R. Searle, *The Construction of Social Reality*, New York, Free Press, 1995 [traduction française : *La construction de la réalité sociale*, Paris, NRF-Gallimard, 1998].

- les sciences de l'homme et de la société*, Londres, Hermes-Sciences & Lavoisier, 2006, p. 103-120 [traduction anglaise : « Assessment and Validation of Multi-Agent Model », dans Denis Phan et Frédéric Amblard (dir.), *Agent-Based Modelling and Simulation in the Social and Human Sciences*, Oxford, The Bardwell Press, 2007, p. 93-114].
- Atlan, Henri, *Entre le cristal et la fumée*, essai sur l'organisation du vivant, Paris, Seuil, [1979] 1986.
- Axtell, Robert L, « La fin des débuts pour les SMA en sciences sociales », dans Frédéric Amblard et Denis Phan (dir.), *Modélisation et simulation multi-agents, applications pour les sciences de l'homme et de la société*, Londres, Hermes-Sciences & Lavoisier, 2006, p. 161-172 [traduction anglaise : « The End of the Beginning for Multi-Agent Systems in Social Sciences », dans Denis Phan et Frédéric Amblard (dir.), *Agent-Based Modelling and Simulation in the Social and Human Sciences*, Oxford, The Bardwell Press, 2007, p. 135-146].
- Batty, Michael, *Cities and Complexity: Understanding Cities with Cellular Automata, Agent-Based Models, and Fractals*, Cambridge (MA), MIT Press, 2005.
- Bommel, Pierre et Jean-Pierre Müller, « An Introduction to UML for Modelling in the Human and Social Science », dans Denis Phan et Frédéric Amblard (dir.), *Agent-Based Modelling and Simulation in the Social and Human Sciences*, Oxford, The Bardwell Press, 2007, p. 273-294.
- Bonabeau, Éric, « Intelligence collective? », dans Éric Bonabeau et Guy Theraulaz (dir.), *Intelligence collective*, Paris, Hermes, 1994, p. 13-28.
- Castelfranchi, Cristiano, « Through the Agents' Minds: Cognitive Mediators of Social Action », *Mind & Society*, vol. 1, n° 1, mars, 2000, p. 109-140.
- Conte, Rosaria et Cristiano Castelfranchi, *Cognitive and Social Action*, London, UCL Press, 1995.
- Daude, Éric et Patrice Langlois, « Comparaison de trois implémentations du modèle de Schelling », dans Frédéric Amblard et Denis Phan (dir.), *Modélisation et simulation multi-agents, applications pour les Sciences de l'Homme et de la Société*, Londres, Hermes-Sciences & Lavoisier, 2006, p. 411-441 [traduction anglaise : « Comparisons of Three Implementations of Schelling's Spatial Segregation Model », dans Denis Phan et Frédéric Amblard (dir.), *Agent-Based Modelling and Simulation in the Social and Human Sciences*, Oxford, The Bardwell Press, 2007, p. 295-326].
- Dessalles, Jean-Louis, Jacques Ferber et Denis Phan, « Emergence in Multi-Agent Systems: Review of Conceptual and Methodological

- Issues for the Application to the Social Sciences », dans Ang Yang et Yin Shan (dir.), *Intelligent Complex Adaptive Systems*, Idea Group Inc, 2008, p. 255-299.
- Dessalles, Jean-Louis, Jean-Pierre Müller et Denis Phan, « Emergence in Multi-Agent Systems: Conceptual and Methodological Issues », dans Denis Phan et Frédéric Amblard (dir.), *Agent-Based Modelling and Simulation in the Social and Human Sciences*, Oxford, The Bardwell Press, 2007, p. 327-356.
- Epstein, Joshua M., *Generative Social Science: Studies in Agent-Based Computational Modeling*, Princeton University Press, 2006.
- Epstein, Joshua M. et Robert L. Axtell, *Growing Artificial Societies, Social Sciences from the Bottom Up*, Washington (DC), Brooking Institution Press, Cambridge (MA), MIT Press, 1996.
- Ferber, Jacques, *Les systèmes multi-agents*, Paris InterEditions, 1995 [édition anglaise : *Multi-Agent Systems: An Introduction to Distributed Artificial Intelligence*, Harlow, Addison Wesley Reading, 1999].
- Ferber, Jacques, « Introduction aux concepts et méthodologies de conception multi-agents », dans Frédéric Amblard et Denis Phan (dir.), *Modélisation et simulation multi-agents, applications pour les Sciences de l'Homme et de la Société*, Londres, Hermes-Sciences & Lavoisier, 2006, p. 23-48 [traduction anglaise : « Multi-Agent Concepts and Methodologies », dans Denis Phan et Frédéric Amblard (dir.), *Agent-Based Modelling and Simulation in the Social and Human Sciences*, Oxford, The Bardwell Press, 2007, p. 7-34].
- Fourquet, François, *Les comptes de la puissance. Histoire de la comptabilité nationale et du Plan*, Paris, Encres, 1980.
- Fraasen, Bas C. van, *The Scientific Image*, Oxford, Oxford University Press, 1980.
- Fraasen, Bas C. van, *Scientific Representation: Paradoxes of Perspective*, Oxford, Oxford University Press, 2008.
- Grimm, Volker, « Ten Years of Individual-Based Modelling in Ecology: What Have We Learned and What Could We Learn in the Future? », *Ecological Modelling*, n° 115, 1999, p. 129-148.
- Leigh Tesfatsion et Kenneth L. Judd, *Handbook of Computational Economics, Vol. 2. Agent-Based Computational Economics*, Amsterdam, New York, Elsevier North-Holland, 2006.
- Gilbert, Nigel, « Sciences sociales computationnelles : simulation sociale multi-agents », dans Frédéric Amblard et Denis Phan (dir.), *Modélisation et simulation multi-agents, applications pour les Sciences de l'Homme et de la Société*, Londres, Hermes-Sciences & Lavoisier, 2006, p. 141-

- 160 [traduction anglaise : « Computational Social Sciences: Agent-Based Social Simulation », dans Denis Phan et Frédéric Amblard (dir.), *Agent-Based Modelling and Simulation in the Social and Human Sciences*, Oxford, The Bardwell Press, 2007, p. 115-134].
- Gilbert, Nigel et Rosaria Conte (dir.), *Artificial Societies: The Computer Simulation of Social Life*, London UCL Press, 1995.
- Gilbert, Nigel et Jim E. Doran (dir.), *Simulating Societies: The Computer Simulation of Social Phenomena*, London, UCL Press, 1994.
- Gilbert, Nigel et Klaus G. Troitzsch, *Simulation for the Social Scientist, Second Edition*, Milton Keynes, Open University Press, 2005.
- Thomas R. Gruber, « Toward Principles for the Design of Ontologies Used for Knowledge Sharing », dans Nicola Guarino et Roberto Poli (dir.), dans *International Workshop on Formal Ontology*, Padova (Italie), version révisée, mars 1993, disponible comme rapport technique KSL-93-04, Knowledge Systems Laboratory, Stanford University, <http://www-ksl.stanford.edu/knowledge-sharing/papers/onto-design.rtf>.
- Hanson, Norwood, *Russell Patterns of Discovery*, Cambridge (MA), Cambridge University Press, 1958 [traduction française, Les Modèles de la découverte, Dianoia, 2000].
- Krantz, David H., R. Duncan Luce, Patrick Suppes et Amos Tversky, *Foundations of Measurement, Vol. I: Additive and Polynomial Representations* (1971), *Vol. II: Geometrical, Threshold, and Probabilistic Representations* (1989), *Vol. III: Representation, Axiomatization, and Invariance* (1990), New York, Academic Press, 1971-1990 [réédition de l'ensemble des 3 ouvrages par Dover Publications Inc., 2009].
- Livet, Pierre, « Essai d'épistémologie de la simulation multi-agents en sciences sociales », dans Frédéric Amblard et Denis Phan (dir.), *Modélisation et simulation multi-agents, applications pour les sciences de l'homme et de la société*, Londres, Hermes-Sciences & Lavoisier, 2006, p. 193-218 [traduction anglaise : « Towards an Epistemology of Multi-Agent Simulation in Social Science », dans Denis Phan et Frédéric Amblard (dir.), *Agent-Based Modelling and Simulation in the Social and Human Sciences*, Oxford, The Bardwell Press, 2007, p. 169-193].
- Livet, Pierre, Jean-Pierre Müller, Denis Phan et Lena Sanders, « Ontology, A Mediator for Agent Based Modeling in Social Science », *JASSS*, vol. 13, n° 1, 2010, <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/13/1/3.html>. Livet, Pierre et Frédéric Nef, *Les êtres sociaux : processus et virtualité*, Paris, Hermann, 2009.
- Livet, Pierre et Denis Phan, « Ontologie et émergence pour les SHS : suppléments aux notions d'émergence de Bonnabeau, Dessalles et

- Müller », dans Denis Phan (dir.), *Rochebrune'09 : XVI^e rencontres interdisciplinaires sur les systèmes complexes naturels et artificiels. Ontologie et dynamique des systèmes complexes*, Paris, à paraître en 2010.
- Livet, Pierre, Denis Phan et Lena Sanders, « Why Do We Need Ontology for Agent-Based Models? », dans Klaus Schredelseker et Florian Hauser (dir.), *Complexity and Artificial Markets, Series Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, n° 614, Berlin, Springer, p. 133-146.
- Livet, Pierre et Ruwen Ogien, « L'enquête ontologique, du mode d'existence des objets sociaux », *Raisons pratiques*, n° 11, Paris, Éditions de l'École des hautes études en sciences sociales, 2000.
- Livet, Pierre et Lena Sanders, « Le "test ontologique" : un outil de médiation pour la modélisation agent », dans Denis Phan (dir.), *Rochebrune'09 : XVI^e rencontres interdisciplinaires sur les systèmes complexes naturels et artificiels. Ontologie et dynamique des systèmes complexes*, Paris, à paraître en 2010.
- Manzo, Gianluca, « Variables, mécanismes et simulations : une synthèse des trois méthodes est-elle possible? Une analyse critique de la littérature », *Revue française de sociologie*, vol. 46, n° 1, 2005, p. 37-74.
- Manzo, Gianluca, « Progrès et "urgence" de la modélisation en sociologie. Du concept de modèle générateur et de sa mise en œuvre », *L'Année sociologique*, vol. 57, n° 1, 2007, p. 13-61.
- Minsky, Marvin L., « Matter, Mind and Models », *Proceedings of IFIP Congress*, 1965, p. 45-49.
- Morgan, Mary S. et Margaret Morrison, *Models as Mediators*, Cambridge (MA), Cambridge University Press, 1999.
- Morgenstern, Oskar, *On Accuracy of Economic Behavior*, Princeton (NJ), Princeton University Press, 1950 [traduction française, *Précision et incertitude des données économiques*, Paris, Dunod, 1972].
- Moulines, C. Ulises, *La philosophie des sciences : l'invention d'une discipline (fin XIX^e - début XXI^e siècle)*, Paris, Éditions Rue d'Ulm / Presses de l'ENS, 2006.
- Müller, Jean-Pierre, « La notion de cadre conceptuel: penser la place des ontologies dans le processus de modélisation », dans Denis Phan (dir.), *Rochebrune'09 : XVI^e rencontres interdisciplinaires sur les systèmes complexes naturels et artificiels. Ontologie et dynamique des systèmes complexes*, Paris, à paraître en 2010.
- Phan, Denis *et al.*, « Qu'est-ce qu'une ontologie? Comment procéder? L'exemple de la ségrégation spatiale », dans Denis Phan (dir.), *Ontologies pour la modélisation multi-agents en sciences humaines et sociales*, à paraître en 2010.

- Phan, Denis, Anne-Françoise Schmid et Franck Varenne, « Epistemology in a Nutshell: Theory, Model, Simulation and Experiment », dans Denis Phan et Frédéric Amblard (dir.), *Agent-Based Modelling and Simulation in the Social and Human Sciences*, Oxford, The Bardwell Press, 2007, p. 357-392.
- Quine, Willard Van Orman, *Methods of Logic*, Second edition, Cambridge (MA), Harvard University Press, 1950 [traduction française, Maurice Clavelin, *Méthodes de Logique*, Paris, Armand Colin, 1972].
- Sanders, Lena, « Les modèles agent en géographie urbaine », dans Frédéric Amblard et Denis Phan (dir.), *Modélisation et simulation multi-agents, applications pour les Sciences de l'Homme et de la Société*, Londres, Hermes-Sciences & Lavoisier, 2006, p. 151-168 [traduction anglaise : « Agent Model in Urban Geography », dans Denis Phan et Frédéric Amblard (dir.), *Agent-Based Modelling and Simulation in the Social and Human Sciences*, Oxford, The Bardwell Press, 2007, p. 147-168].
- Sawyer, R. Keith, *Social Emergence: Societies as Complex Systems*, Cambridge (MA), Cambridge University Press, 2005.
- Schelling, Thomas C., « Dynamic Models of Segregation », *Journal of Mathematical Sociology*, 1, p. 143-186.
- Schelling, Thomas C., *Micromotives and Macrobehaviour*, New York, Norton and Co., 1978 [traduction française : *La tyrannie des petites décisions*, Paris, PUF, 1980 (réédition Dunod, 2007)].
- Schelling, Thomas C., « Models of Segregation », *American Economic Review*, vol. 59, n° 2, p. 488-493.
- Schmid, Anne-Françoise, *L'âge de l'épistémologie*, Paris, Kimé, 1998.
- Searle, John R., *The Construction of Social Reality*, New York, Free Press, 1995 [traduction française : *La construction de la réalité sociale*, Paris, NRF-Gallimard, 1998].
- Smith, Barry, « Ontology », dans Luciano Floridi (dir.), *Blackwell Guide to the Philosophy of Computing and Information*, Oxford, Blackwell, 2003, p. 155-166.
- Varenne, Franck, *Du modèle à la simulation informatique*, Paris, Vrin, 2007.
- Walliser, Bernard, Denis Zwirn et Hervé Zwirn, « Raisonnements non certains et changement de croyances », dans Thierry Martin (dir.), *Probabilités subjectives et rationalité de l'action*, Éditions du CNRS, 2003, p. 47-66.
- Weisbuch, Gérard, *Dynamique des systèmes complexes : une introduction aux réseaux d'automates*, Paris, InterEditions / CNRS, 1989 [traduction anglaise : *Complex Systems Dynamics, Santa-Fe Institute Studies in the*

- Sciences of Complexity*, Redwood City, CA Addison-Wesley, 1990].
- Wilber, Ken, *Integral Psychology: Consciousness, Spirit, Psychology, Therapy*, Boston (MA), Shambhala, 2000.
- Zwirn, Hervé P., *Les limites de la connaissance*, Paris, Odile Jacob, 2000.