

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/255991578>

Complexité et portée des modèles

Chapter · March 2014

DOI: 10.13140/2.1.2622.0320

CITATIONS

0

READS

192

1 author:



Franck Varenne

Université de Rouen

103 PUBLICATIONS 515 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Models and simulations in developmental biology and in spatial analyses (geography) [View project](#)



Interpretability and Explainability in Machine Learning [View project](#)

Complexité et portée des modèles :

modèles globaux, modèles locaux

Franck Varenne¹

Université de Rouen & GEMASS (UMR 8598 / CNRS - Paris Sorbonne)

franck.varenne@univ-rouen.fr

Introduction

Dans les problématiques de développement durable, il ne suffit pas de dire que les situations sont complexes. C'est déjà le cas en biologie ou en sciences sociales. Il faut également comprendre que les questions posées concernent des espaces de pratiques, de réflexion, de conceptualisation et d'expérimentation très hétérogènes dès lors qu'ils se trouvent aux interfaces des sciences de l'environnement et des sciences sociales. Lorsqu'il s'agit de problématiques de changement global, plusieurs disciplines et mêmes plusieurs champs disciplinaires sont concernés (nature, société) : or, dans toutes ces disciplines, les objets considérés, mais aussi les échelles de temps et d'espaces, sont de natures très hétérogènes. Historiquement, et de façon compréhensible, ces problématiques mixtes se sont cependant assez vite saisies des méthodes de modélisation mathématique du type de celles qui étaient en usage en biométrie ou en écologie scientifique. Ces méthodes paraissent en effet assez ouvertes à l'interdisciplinarité car peu prescriptives en termes d'ontologie : à tout coup, le moins disant mathématique semblait permettre au moins l'interconnexion et le dialogue formel. En 1993, par exemple, la création de la revue interdisciplinaire *Natures Sciences Sociétés* (NSS) est venue confirmer la prise de conscience de l'opportunité d'une telle stratégie d'élargissement des domaines d'application des modèles mathématiques traditionnels : depuis lors, la question des modèles, de leur portée et de leurs fonctions y est constamment reprise.

Or, la méthode des modèles vit une crise². C'est une crise de croissance certes, mais une crise quand même. En effet, si une fameuse devise pour les défis futurs commande qu'il faut penser globalement et agir localement, de plus en plus de chercheurs, quant à eux, soutiennent que les modèles, pour être crédibles, doivent être détaillés. Avec la tendance récente à la complexification des modèles, les problèmes qui ont un sens d'un point de vue global peuvent de moins en moins se traduire directement dans des maximes de l'action locale. En conséquence, il apparaît méthodologiquement contestable de vouloir à la fois penser globalement et agir localement : pour agir localement, il faudrait déjà penser localement, c'est-à-dire en contexte. Car les modèles,

¹ Je tiens à remercier le relecteur anonyme ainsi que Pierre Matarasso qui m'ont aidé à améliorer ce texte.

² Il est souvent affirmé qu'on ne pense et ne fait de la science qu'à travers des modèles. Ce « modélisme » rétroactif entraîne parfois des anachronismes conceptuels. Par « méthode des modèles » nous entendons ici ce que nombre de scientifiques nomment eux-mêmes ainsi (comme Legay 1997) : à savoir les diverses pratiques des modèles *formels* (nommés largement et effectivement « modèles » à partir des années 1950, dans la littérature scientifique) telles qu'elles se développent et qu'elles mettent notamment au second plan l'ancienne notion de « loi », mais pas seulement elle, depuis lors. Le *tournant formel des modèles* est bien entendu ce qui est plus précisément visé ici et non tout type d'usage de maquettes, comme il y en eut certes dès l'Antiquité et même avant. Voir Varenne (2010c) : c'est dans ce *tournant formel* que réside le caractère inédit des usages contemporains des modèles. Car théories, lois et modèles semblent être dès lors de même facture (des systèmes de symboles logico-mathématiques) alors même qu'elles prétendent encore avoir des fonctions de connaissance (ou fonctions épistémiques) différentes. Ces trois types de formalisation sont de ce fait entrés directement tantôt en concurrence tantôt dans des rapports de complémentarité tout au long du 20^{ème} siècle.

en se complexifiant, nous donnent éventuellement des indications sur une action locale possible, mais, la contrepartie de cet apport tient à ce qu'ils ne sont plus nécessairement porteurs d'une compréhension générale des problèmes en présence : leur transposabilité, déjà limitée en principe (c'est pourquoi d'ailleurs on les nomme « modèles » et non plus « théories », signe de l'apparente modestie épistémologique de notre époque) devient encore plus contestable. Leur caractère significatif ne semble plus pouvoir être que local. Ou alors, si l'on cherche toujours à comprendre, on mobilise d'autres modèles qui, eux, restent certes de compréhension, mais qui ne semblent plus pouvoir être couplés aux modèles plus détaillés et de terrain, cela par nature, c'est-à-dire pour des raisons à la fois techniques et épistémologiques.

Au minimum, même sans être considérablement complexifiés ou détaillés, beaucoup de modèles sont déclarés utiles dans la mesure même où ils restent significatifs pour les parties prenantes locales, les *stakeholders*, ne serait-ce que dans leur fonction d'espace de dialogue¹. De tels modèles font donc sens, ne sont significatifs que dans le contexte ou dans la problématique concrète et finalement précise qui leur a donné naissance : les modèles participatifs ou les modélisations d'accompagnement en sont un autre cas exemplaire². Ces pratiques de modélisation partent de l'hypothèse, féconde dans bien des cas, selon laquelle il faut cesser de croire que la solution du problème que l'on se pose peut être apportée d'en haut et de l'extérieur par des experts non impliqués dans les enjeux du problème en question. Mais les solutions d'accompagnement qu'elles suggèrent sont particulières et ne sont pas généralisables par définition : le contexte et sa particularité y sont parties prenantes. Pourtant, il paraît hautement souhaitable que de tels modèles de terrain soient à leur tour intégrés dans des modèles complexes valant à plus grande échelle. Mais là, nous ne sommes pas seulement face à des difficultés techniques (de formalisation, de robustesse, de validation) : ce sont les fonctions épistémologiques de ces modèles elles-mêmes qui entrent en contradiction. Ainsi s'explique en partie la multiplication de réflexions épistémologiques émanant du cœur même de la communauté scientifique. Ce chapitre a pour objectif de poser le problème, de montrer que les solutions traditionnelles ont des limites, limites qu'un travail épistémologique plus précis et approfondi pourrait peut-être aider à dissiper.

Dans la première section, je présenterai succinctement les fonctions traditionnelles des modèles dans les sciences contemporaines. Dans la deuxième section, je reviendrai sur certaines évolutions récentes des modèles qui se situent à l'interface natures/sociétés et qui semblent difficilement convenir à cette classification pourtant large et ouverte. Dans les trois sections suivantes, je montrerai les limites des approches annonçant la résolution de cette tension, que ce soit en termes de simplicité, de généralité ou de langage des frontières. Pour finir, je suggérerai l'idée qu'une nouvelle épistémologie de la référence, à la fois rigoureuse et différenciée, doit émerger afin de contribuer à l'effort de modélisation des phénomènes mixtes, à l'interface entre nature et société.

1- Les fonctions traditionnelles des modèles

Je partirai d'une caractérisation minimale de la notion de modèle. Pour ce faire, on peut s'appuyer sur l'idée de Minsky³ selon laquelle un modèle est un objet B (matériel, formel ou symbolique) qui permet de répondre à une question que l'on se pose au sujet d'un objet A. Un modèle est donc un objet qui a valeur de

¹ Kieken (2004).

² Bazile *et al.* (2005).

³ Marvin Minsky : « Matter, Mind and Models », *Proceedings of IFIP Congress*, 1965, p. 45-49.

substitut, mais seulement dans le cadre d'un questionnement précis, valant pour un questionneur précis. Ce n'est donc pas dans l'absolu que le modèle se substitue à l'objet cible, mais relativement à un questionnement concernant cet objet. En particulier, B n'est pas toujours un substitut de A au sens fort, c'est-à-dire au sens d'une représentation de A, par exemple : un modèle n'a pas toujours à être une représentation. Un modèle n'est donc pas toujours une représentation simplifiée, comme on le lit souvent. Il peut être simplement une grille de lecture, comme une grille d'analyse de données. L'approche minimale et non-représentationniste de Minsky (inspirée de la définition behavioriste du signe comme on peut la trouver chez Morris) présente l'intérêt d'être très ouverte et pragmatiquement orientée. À travers elle, on peut considérer tout modèle comme étant un objet médiateur, un objet qui permet une médiation entre une capacité cognitive et un objet cible. Morgan et Morrison (1999) ont soutenu une thèse épistémologique, proche et relativement consensuelle aujourd'hui, selon laquelle un modèle est un médiateur entre une théorie et des données expérimentales. Si on considère que les données expérimentales jouent ici le rôle du système cible, on retrouve bien la caractérisation proposée ici. La limite du travail de Morgan et Morrison tient au fait qu'il a surtout en vue la capacité cognitive théorique et qu'il néglige de fait les autres capacités cognitives et donc les autres médiations que les modèles scientifiques peuvent aussi favoriser.

En réalité, un modèle peut être un médiateur facilitant différentes tâches cognitives. Parmi la vingtaine de fonctions épistémiques assurées par les modèles¹ que l'on peut recenser, on peut distinguer cinq grandes catégories ordonnées selon les types de tâches cognitives que le modèle facilite. Dans un autre travail², j'ai proposé de résumer ainsi ces 5 catégories :

1- Il peut faciliter une expérience sensible : il facilite une observation, une visualisation, mais aussi le rendu d'une expérience ou d'une expérimentation ;

2- Il peut faciliter une présentation ou une formulation intelligible : un modèle peut faciliter notre accès intelligible à un objet cible grâce à une représentation mentale ou grâce à une conceptualisation de sa structure ou de sa dynamique. Cette conceptualisation peut elle-même prendre des formes variées, voire opposées : elle peut prendre la forme de modèles phénoménologiques purement prédictifs ou de modèles à visée explicative, donc à scénario explicatif.

3- Il peut faciliter une théorisation : le modèle peut servir à élaborer progressivement une théorie non encore mature (essai localisé d'une structure d'inférence). Il peut servir aussi à illustrer une théorie, à interpréter une théorie, à tester la cohérence d'une théorie ou encore à en permettre l'applicabilité. Dans ce contexte, une théorie se distingue d'un modèle en ce qu'elle se présente comme un ensemble d'énoncés – éventuellement formalisés et axiomatisés – formant système et donnant lieu à des inférences susceptibles de valoir pour tout un type de phénomènes donné, alors qu'un modèle se limite souvent à mettre en ordre un ensemble de « contraintes particulières sur des interactions »³.

4- Il peut faciliter une médiation entre discours : un modèle peut être un instrument médiateur entre différentes disciplines, différents domaines du savoir, ou différents groupes humains ayant des représentations collectives ou des intérêts divergents. Dans ce cadre-là, un modèle facilite une médiation non entre un objet et une appréhension directement sensible, instrumentée, conceptuelle ou théorique de cet objet. Mais il facilite une médiation entre des discours et des représentations d'acteurs⁴ autour d'un problème ou d'un phénomène représenté de manière multiple mais reconnu par toutes les parties en présence comme devant être abordé avec des questions communes. À ce titre, le modèle sert encore à un questionnement : mais il en reste à la première étape du

¹ Pour une recension plus complète, voir Varenne (2011) dans lequel nous détaillons 20 fonctions différentes des modèles comme représenter, expliquer, prédire un système, analyser des données, compresser des données (modèle grille de lecture), explorer un concept, interpréter, montrer la cohérence d'une théorie, permettre une expérience déléguée sur un objet substitutif, ébaucher une théorie, permettre un dialogue, permettre un enseignement, une mémorisation, une traduction, un co-calcul de théories formalisées axiomatiquement incompatibles...

² (Varenne 2011).

³ Selon l'expression de Pierre Livet dans Phan & Amblard (2007).

⁴ L'objet cible demeure mais il est ici un discours ou un ensemble de discours ou de représentations.

questionnement. Il sert seulement à élaborer une formulation commune du questionnement plus qu'il ne permet déjà une réponse à des questions qui seraient déjà formulées de manière consensuelle.

5- Il peut faciliter une décision pour l'action (cognition pratique). Il existe ainsi des modèles qui ne servent pas tant à produire une représentation valable ni à formuler un questionnement qu'à faciliter la détermination d'un type de réponse attendu en termes d'action. Cette action est urgente et peut se passer de l'étape intermédiaire de représentation ou de conceptualisation en ce qu'elle vise à résoudre immédiatement un problème, par exemple à diminuer des dommages imminents ou encore à optimiser des gains.

Quand on parcourt la littérature sur les modèles, on perçoit qu'il y a un certain accord sur cette diversité des types de modèles. Cette diversité elle-même est en général rapportée à l'objectif de connaissance ponctuellement visé, et dont la formulation explicite doit être préalable à l'élaboration puis à la mise en œuvre du modèle. Si certains travaux insistent sur les modèles théoriques, d'autres mettent en avant la dimension pragmatique ou dialogique des modèles, sans que cette diversité d'approches mène à une guerre des modèles : chacun doit simplement rappeler le cadre et la fonction épistémique précise qu'il assigne chaque fois à son modèle.

Il est reconnu largement qu'il y a des approches complémentaires. Et si l'on reste dans une même approche, on considère souvent qu'il y a au pire des hiérarchies de modèles et non des dialectiques ou des concurrences directes entre eux. Concernant les modèles de changement climatiques faisant intervenir les actions humaines, par exemple, le troisième rapport d'évaluation du GIEC (2001) souligne à deux reprises, aux chapitres 1 et 8, la nécessité de recourir à une telle hiérarchie de modèles, ne serait-ce que pour des raisons de praticabilité du calcul :

L'impact des perturbations anthropogéniques sur le système climatique peut être projeté en calculant tous les processus clés opérant dans le système climatique au moyen d'une formulation mathématique qui, du fait de sa complexité, ne peut être implémentée que dans un programme d'ordinateur. Si toutes les compréhensions actuelles du système climatique étaient explicitement incluses, le modèle serait trop complexe pour tourner sur les ordinateurs existants. En conséquence, pour des raisons pratiques, des simplifications sont faites afin que le système ait une complexité réduite et qu'il présente les spécificités demandées pour le calcul. Comme différents niveaux de simplifications sont possibles, une hiérarchie de modèles tend à se développer. Le besoin d'un compromis entre la compréhension scientifique, l'efficacité computationnelle¹ et le réalisme du modèle guide souvent le choix d'une classe particulière de modèles.²

Le rapport du GIEC de 2007 reprend explicitement la même argumentation³. À côté de cette diversité bien reconnue, un autre point semble rencontrer le consensus. Il est comme le corrélat du premier point : il doit être proscrit qu'un même modèle se voit attribuer deux fonctions épistémiques distinctes⁴. En effet, si c'est bien le contexte du questionneur et du questionnement qui détermine la stricte portée épistémique d'un modèle, il doit être proscrit d'utiliser un modèle construit pour un questionnement à des fins autres et pour résoudre un autre problème. Il doit être impossible de considérer, par exemple qu'un modèle soit à la fois de compréhension et d'action.

¹ Signifie seulement ici : « efficacité » de la computation au regard à la fois du temps demandé et de la qualité des résultats. Pour « computation » et « computationnel », voir notre note *infra*.

² IPCC, 2001, chapitre 1, notre traduction.

³ IPCC, 2007, chapitre 8.

⁴ Dans la section 8.8 de ce dernier rapport du GIEC (2007), section dédiée à « La représentation du système global au moyen de modèles plus simples », les auteurs du rapport rappellent ce point : « Ce qui est important est que chaque modèle se voit poser des questions appropriées à son niveau de complexité et à la qualité de sa simulation », *ibid.*, p. 643.

Les auteurs du rapport de 2007 précisent aussi qu'une autre forme de hiérarchie doit être considérée : celle qui va des modèles régionaux aux modèles ayant pour objet le système climatique global, le système considéré à l'échelle de la terre¹. Ce n'est pas la même hiérarchie : l'une porte sur la variation des degrés de détail du modèle, l'autre porte sur la plus ou moins grande extension de l'objet cible. La seconde hiérarchie s'impose scientifiquement du fait que beaucoup de processus intervenant à petite échelle (échelle locale) ne peuvent être représentés explicitement dans les modèles à objet global, mais qu'ils doivent tout de même apparaître, puisqu'y participant, bien que sous des formes approchées². Ces formes approchées sont ce que l'on appelle souvent des paramétrisations³. Or, en 2007, les auteurs du rapport du GIEC précisent que cette contrainte de fournir des formes approchées (parfois grossières donc possiblement erronées) de tels processus locaux ne tient pas seulement aux limitations en puissance de calcul des ordinateurs mais qu'elle tient aussi à un défaut de compréhension de ces phénomènes locaux comme à un manque de données précises les concernant⁴. À côté des modèles globaux ou universels dont on ne ferait que dégrader *ex post* le réalisme ou le rendu des détails, il apparaît donc nécessaire que des modèles régionaux continuent de se développer en parallèle et qu'ils continuent de s'affiner en travaillant à améliorer leur propre réalisme à échelle locale.

Il faut comprendre que ces deux hiérarchies de modèles ne sont pas superposables *a priori* : un modèle global peut certes présenter un niveau de détail assez fin, et donc un dimensionnement renvoyant aux échelles locales. Mais si ce modèle global n'a pas déjà été conçu comme un système intégrant explicitement des modules à supports locaux (i.e. des sous-modèles ayant eux-mêmes des objets cibles localisés et référencés, comme des régions du globe), ses détails seront des paramètres certes « locaux », mais plaqués *ex post*. Car ces détails n'auront pas de signification par ailleurs dans un scénario explicatif réaliste local, c'est-à-dire qu'ils n'auront pas de sens géophysique ou écologique précis à échelle locale. Ces paramètres *ad hoc* ne peuvent entrer à leur tour dans un scénario scientifique qui pourrait les expliquer à l'échelle locale.

Pour mieux comprendre ce point décisif, on peut se reporter à la différence d'engagement ontologique qui existe dans les divers types de simulations computationnelles en sciences sociales⁵. Dans les années 1960, les

¹ *Ibid.*, p. 596.

² Du point de vue de l'écologie, dans cette seconde hiérarchie, il est possible de raffiner et de voir que l'on confond encore deux choses différentes : les hiérarchies au sens propre et les échelles. Voir Gunnel (2009), p. 313-314 : « Un tronc d'arbre pourrissant est plus petit que l'écosystème forestier au sein duquel il se trouve, mais c'est un paysage de mousses [...] Autrement dit, les niveaux conventionnels d'organisation du réel n'ont pas de dépendance d'échelle *a priori*. Le concept de biome peut très bien s'appliquer à un creux à gel dans une forêt. Les niveaux hiérarchiques sont donc au mieux des approches, des perspectives, des critères servant de cadre à un système d'observations. D'un point de vue scalaire, c'est l'animal ou l'espèce étudiée qui impose la métrique (en fonction de sa maille territoriale, pour un animal), et non la hiérarchie conceptuelle, qui est anthropocentrique [...] Une échelle implique une dimension physique, une quantification et des unités de mesure alors qu'il n'existe pas d'unités prédéfinies pour désigner un niveau hiérarchique. »

³ Kandel, (2002), p. 90 ; Guillemot (2007), p. 101.

⁴ *Ibid.*, p. 601.

⁵ Voir le détail dans Varenne (2010b et 2011). Dans (Varenne, 2011), nous définissons ce que signifie « science computationnelle », terme aujourd'hui omniprésent dans le titre de nombreux programmes de recherches et de revues scientifiques. Il est devenu très significativement *intraduisible* pour les francophones car le vieux mot « informatique » ne vaut plus ici (Varenne 2009b) : « C'est une science qui utilise systématiquement des modèles sur ordinateur. Il est à noter plus précisément que, dans ce cadre dit 'computationnel', l'ordinateur n'est pas seulement une machine à calculer programmable : c'est une machine à *simuler le traitement pas à pas d'un modèle formalisé* [...] De façon générale, une *computation* est une *opération pas à pas sur des symboles* », *ibid.*, p. 152. Ainsi, en revenant à la racine du mot anglais *computer*, la science d'aujourd'hui donne tort au choix terminologique français de créer le mot « ordinateur » (sauf si l'on veut réduire le computer à son usage restreint aux réseaux, au seul internet et aux STIC) car on élargit au maximum et radicalement les usages de l'« ordinateur » et les représentations que l'on s'en fait en le libérant du seul domaine du transfert et du traitement de l'information ou du seul calcul approché. Car une computation est beaucoup moins spécifique que cela : elle « peut être interprétée comme un calcul ou comme autre chose encore, par exemple comme une simulation (au sens ici d'une 'imitation') directe d'objets du monde réel. Le traitement pas à pas de modèles de processus complexes – parfois avec plusieurs sous-processus en parallèle ou imbriqués – est caractéristique de ce que peut faire un ordinateur. », *ibid.*, p. 152. Si les éléments interagissant au cours de la computation sont le fruit d'une discrétisation en éléments finis d'un modèle mathématique analytiquement non traitable, on a une *simulation numérique*. Si ces éléments ne sont pas les produits d'une discrétisation préalable de modèle, mais dénotent directement des entités et des règles propres au système cible simulé (lui-même réel ou

micro-simulations de Orcutt (1960) et de son équipe procédaient par exemple d'un choix de fragmentation par atomisation (ou numérisation) *ex post* d'un modèle mathématique validé à échelle globale. Cette atomisation présentait certes l'intérêt de retrouver l'échelle des individus, des agents sociaux particuliers. Mais comme cette atomisation se faisait du haut vers le bas, les individus représentés dans le modèle étaient hautement fictifs : ils n'étaient en réalité que des trucs de calcul pour rendre le modèle plus aisément calculable et manipulable pour des tests de scénarios alternatifs (en matière de politique fiscale, notamment). Leur formulation ne venait pas d'une connaissance sociologique de type de celle mobilisée par l'individualisme méthodologique, comme c'est en revanche le cas en sociologie computationnelle contemporaine : les approches par systèmes multi-agents entendent procéder aujourd'hui du bas vers le haut et non du haut vers le bas¹. Elles s'engagent donc ontologiquement en faveur de systèmes cibles locaux et individuels, en espérant expliquer par là des formes typiques d'émergence de faits sociaux à partir de la formalisation explicite du comportement des individus².

À l'image de ce qui se passe dans les modèles de climat où il y a une tendance à représenter de plus en plus les processus locaux³, dans ces simulations sociales à agents, les processus locaux sont donc explicités. Or, on n'arrive pas à un tel modèle local de simulation en affinant simplement les détails d'un modèle mathématique global : il faut en réalité tout changer (et donc changer de hiérarchie), à commencer par le support formel, le langage employé par le modèle lui-même. Le tournant computationnel commence justement à intervenir massivement dans les sciences sociales parce qu'il permet une émancipation à l'égard des seuls formalismes mathématiques et de leurs fortes contraintes en termes de formulation. Il permet des ancrages ontologiques plus variés et en même temps plus fermes, avec certes pour contrepartie une plus grande fragilité en termes de robustesse des résultats de simulation⁴. Aujourd'hui, ce sont de plus en plus les langages de programmation qui forment la véritable infrastructure formelle d'implémentation préalable des modèles de systèmes sociaux complexes. Les mathématiques y interviennent encore, mais souvent dans des modules particuliers. Il n'y a donc pas continuité mais le plus souvent rupture formelle entre approche globale au sens fort et approche locale au sens fort (i.e. non simulée par numérisation *ex post*), même si on peut toujours donner l'impression que l'on peut rétablir le contact au moyen de trucs de calcul, c'est-à-dire remonter ou redescendre dans ce qui semblerait être alors une seule et unique hiérarchie.

2- L'évolution récente des modèles à l'interface natures / sociétés

Zones ateliers

fictif), on a affaire à une *simulation algorithmique*. Si les deux types de computation ont lieu en même temps, on a affaire à une *simulation informatique*. Si ces éléments dénotent univoquement (i.e. à la manière d'une *notation non ambiguë*, au sens de Goodman, 1968) des symboles logiques et des règles de transformations strictes sur ces symboles (simulant donc des actes de *déduction*), on a une computation qui relève d'un *calcul formel* (ce que font certains logiciels dédiés aujourd'hui). Pour toutes ces précisions et d'autres, voir (Varenne 2008, 2009a, 2009b) et (Phan & Varenne 2010) (en ligne).

¹ Voir Epstein & Axtell (1996), Phan & Amblard (2007).

² Gilbert (2008).

³ Car certains de ces processus locaux, à petite échelle, peuvent avoir directement un impact à grande échelle. À échelle régionale, leur contribution n'est donc pas simplement statistique. C'est typiquement le cas des nuages : « La complexité de leur rôle dans le bilan du rayonnement reçu ou émis par la Terre et la grande sensibilité de la machine climatique à des modifications apparemment modestes de ces nébulosités expliquent qu'ils constituent un facteur d'incertitude privilégié, une source de difficulté majeure pour la formulation de modèles climatiques, et donc l'appréciation d'une modification à venir de notre environnement » Le Treut & Jancovici (2004), p. 39.

⁴ Epstein (2006).

La nécessité de modéliser directement à échelle régionale ou locale les interactions natures / sociétés est donc assez largement reconnue, même si elle ne concerne pas toujours les mêmes communautés de modélisateurs. Depuis le début des années 2000, notamment à travers les nombreux débats publiés dans la revue *NSS*, c'est la notion de « zones ateliers » qui a commencé à s'imposer, en France. Elle a été récemment relayée et formalisée par l'Institut Ecologie et Environnement (INEE) du CNRS. Cette approche a également des relais internationaux au niveau du réseau LTER : *Long Term Ecological Research network*.

D'après un document de cadrage du CNRS, une zone atelier (ZA) est une « zone géographique, souvent à l'échelle régionale, caractérisée par une unité fonctionnelle (forêt, bassin versant, etc.) »¹. Au sein d'une ZA, sont choisis différents sites « instrumentés pour recueillir les données provenant de l'observation et/ou de l'expérimentation »². Ces zones ateliers sont donc des lieux privilégiés d'observations, d'expérimentations, mais donc aussi de modélisations. Elles ont pour objet l'étude d'un grand nombre d'interactions environnementales entre facteurs hétérogènes opérant à échelle locale. Pour partager leurs méthodes et leurs informations, les ZA se constituent elles-mêmes en réseau d'échange. Comme exemple de ZA, on peut citer celle, déjà ancienne, qui étudie le bassin de la Seine tant dans ses dimensions hydrologiques que culturelles. Le rapport 2009 de cette ZA du bassin de la Seine (ancien PIREN-Seine) insiste précisément sur l'importance du « couplage interactif, évolutif et modulaire » des modèles experts à cette échelle locale³. Dans cette zone atelier, en effet, un modèle expert (en l'espèce, conçu par des agronomes) pour l'évolution des conduites culturales en fonction de l'évolution des sols et de l'hydrologie est couplé de manière souple aux modèles d'évolution hydrologique du bassin.

À cette échelle des zones ateliers, on voit donc bien que l'on retrouve la possibilité de mobiliser des savoirs disciplinaires prenant la forme de modèles souvent assez bien maîtrisés et stabilisés. C'est notamment le cas du modèle d'évolution des cultures développé par l'INRA depuis les années 1990. Ce que postule la méthodologie des ZA, c'est donc l'idée selon laquelle c'est dans un premier temps seulement à l'échelle locale que les modèles disciplinaires peuvent correctement s'intégrer les uns aux autres. « Correctement » s'intégrer, c'est-à-dire s'intégrer en un sens à la fois à la fois formel (cela malgré le choix de formalismes hétérogènes mis en œuvre par les modèles d'experts) mais aussi au sens d'une intégration qui respecte la signification disciplinaire et qui n'oblige pas à imposer des paramètres *ad hoc* sans signification écologique, sociologique, économique, agronomique ou géophysique.

Ce n'est pas qu'il faille privilégier *a priori* les modèles qui ont du « sens » et rejeter les modèles phénoménologiques ou de pur ajustement statistique, par exemple. Ces derniers ont leur utilité⁴. Il ne s'agit pas, en effet, d'opposer une science qui véhiculerait et manipulerait encore du sens à une science désormais technocratique car vide de sens. Il s'agit, plus profondément, parce que plus techniquement, de comprendre que cet appel fréquent, et aujourd'hui renouvelé, à fonder les modèles sur ce qui fait immédiatement sens pour chacune des disciplines impliquées, et cela à échelle plus locale (échelle qui fut justement souvent la leur à leur origine, sauf précisément dans les sciences dites de l'univers), provient de la possibilité que cela offre d'ancrer plus directement ces modèles dans des données disponibles et déjà thématiques dans les corpus disciplinaires en question. La possibilité d'un ancrage ontologique pluridisciplinaire, la possibilité de référer par là à des dimensions du réel ou d'appréhension du réel déjà conceptualisées et inscrites dans des savoirs disciplinaires

¹ CNRS, 2008, p. 7.

² *Ibid.*, p. 8.

³ F. Habets, 2009, p. 1.

⁴ Voir *supra* la sous-catégorie des modèles phénoménologiques, dans la catégorie n°2.

mobilisables, cette possibilité propre aux modèles intégratifs locaux est ce qui fonde en réalité une partie de la validité *a priori* des modèles locaux¹. Cette approche par ZA et modélisation locale est développée aujourd'hui précisément parce qu'elle entraîne avec elle un dispositif d'accréditation plus solide que d'autres approches plus spéculatives.

Tournant modulaire

À côté de cette approche locale par zones ateliers, si l'on regarde l'évolution des modèles pluridisciplinaires de ces dernières années, on constate qu'ils tendent à être de plus en plus modulaires : ils ne sont plus vraiment des modèles au sens traditionnel (une représentation censée simplifier la réalité et supposée elle-même simple), mais des systèmes de modèles couplant un ensemble de modèles disparates aux statuts épistémiques hétérogènes². Le constat est bien posé par le travail que Christine Voiron-Canicio effectue dans le domaine de la modélisation spatiale pour l'aménagement à des fins de développement durable :

Aujourd'hui, la plupart des modèles sont dédiés à la compréhension du fonctionnement d'anthroposystèmes et d'écosystèmes complexes, aux multiples composantes interreliées et restent du ressort de spécialistes. Parallèlement, il existe, dans le domaine de l'aménagement local, une forte demande en modélisation spatiale, accessible à des non spécialistes, et qui permette d'assister les décideurs dans leurs orientations d'aménagement. Ces modèles relèvent de la géoprospective territoriale.³

On voit que les modèles de compréhension tendent à se complexifier et qu'ils finissent par ne plus avoir de sens, pour une action locale, y compris en faveur du développement durable. Plus loin, elle précise :

Rendre compte de la complexité spatiale n'est pas chose aisée. Les modèles qui s'attaquent à cette question sont de plus en plus conçus selon une structure modulaire censée représenter, de manière optimale, les systèmes multidimensionnels. Ce type de modélisation est d'un grand intérêt pour la compréhension du fonctionnement des systèmes complexes mais il s'avère compliqué et reste l'affaire de spécialistes. Parallèlement à ce besoin de connaissance fondamentale, il existe une forte attente en modélisation spatiale à finalité géoprospective. L'enjeu est alors de répondre à cette demande par des modèles à la portée du plus grand nombre d'ingénieurs et techniciens territoriaux, permettant de spatialiser à grande échelle la diffusion future d'un phénomène et de guider les décideurs dans leurs préconisations en matière de protection et d'aménagement local.⁴

Le développement des approches modulaires (i.e. par modules ou sous-modèles disciplinaires) pour la modélisation de systèmes complexes locaux a enrichi la connaissance des experts et leur a donné la possibilité de mieux se parler, cela à la différence des grands modèles globaux. Mais, parallèlement, cela a eu pour effet d'opacifier le discours sur les principes qui peuvent régir l'action collective locale et sur les leviers de cette

¹ Dans le même sens, lorsqu'il s'agit de récuser l'accusation classique de sous-détermination des modèles par les données telle qu'elle a été reformulée récemment par Henri Atlan à l'encontre des modèles numériques de climat, Talagrand (2010) répond que de tels modèles « sont construits sur les lois physiques pertinentes, et non sur un ajustement empirique aux observations ». Or, c'est bien ce que l'on peut appeler, là aussi, un *ancrage ontologique*. Talagrand précise que, pour les modèles de climat, « même si l'on se contente d'une résolution géographique assez grossière dans sa description, le nombre de paramètres requis atteint vite plusieurs milliers ». Pour lui donc, « il n'y a guère de place pour un ajustement des coefficients aux observations » sachant par ailleurs que « le nombre de coefficients incertains est seulement d'une dizaine ». Ce qui tend à être vrai des modèles intégratifs locaux dont il est question ici le serait donc déjà des grands modèles numériques de climat.

² Voir une analyse épistémologique plus approfondie dans Phan & Varenne (2010). Sur la tendance actuelle, à première vue contradictoire, à la complexification des modèles, voir Braillard (2008). Selon lui, ces modèles servent à expliquer sans nécessairement permettre de comprendre. Sur les modèles computationnels complexes comme mise en œuvre d'une explication possible et non d'une compréhension, voir également Epstein (2006).

³ Voiron-Canicio (2006), p. 1.

⁴ *Ibid.*, p. 6.

action. Ce n'est donc pas parce qu'une région dispose d'un modèle local de développement que cela lui permet une action collective efficace. Il y a un travail de simplification de modèle à assurer. Les travaux récents de Voiron-Canicio et de son équipe consistent ainsi à simplifier certains de ces modèles pour mener à une approche valable à une échelle plus large, de manière à ce que les acteurs locaux puissent simplement s'en saisir.

Tournant computationnel

Une autre tendance, parallèle, des modèles d'anthroposystèmes est leur recours croissant aux formalismes informatiques. On peut rapporter cela à l'actuel tournant computationnel que connaissent la plupart des sciences à objets complexes. Ce tournant signifie que l'on n'utilise plus prioritairement l'ordinateur comme une simple machine à calculer des modèles mathématiques préalables¹, mais, plus radicalement et plus largement, comme une machine à simuler, pas à pas, de manière discrète, l'ensemble des objets cibles d'un système, de leurs propriétés et de leurs évolutions.

On peut montrer que le tournant computationnel s'impose progressivement dans la plupart des sciences non pas parce que le monde serait lui-même un tissu informationnel ou computationnel, ni parce que le cerveau serait lui-même un ordinateur, comme ont promis de nous le faire croire quelques scientifiques ou philosophes un peu pressés, mais, plus prosaïquement et techniquement, parce que le hachage formel qu'impose l'approche computationnelle permet aux formalismes de s'intriquer bien davantage et de manière bien plus souple que ne le peuvent les approches mathématiques agrégées². En jouant sur l'approche de modélisation par objets informatiques, les modèles hétérogènes peuvent s'échanger des informations, comme de simples valeurs de paramètres, par exemple, sans que le style formel des deux paramètres en question soit toujours uniforme dans le système de modèles que l'ordinateur simule pas à pas³. Avec l'approche computationnelle, les disciplines se croisent vraiment car elles prennent la main chacune à tour de rôle sur le système de modèles : l'interaction entre des facteurs hétérogènes n'y est pas tant mise en formule que mise en scène, pas à pas.

Ainsi, en géographie quantitative, l'approche par les systèmes à agents informatiques se développe de manière irrépensible⁴. Car elle autorise que des données géophysique et de géographie humaine soient simultanément prises en charge par le même système d'agents ou le même automate cellulaire. C'est ensuite, dans les interactions pas à pas, interactions que permet justement la simulation, que la traversée constante des frontières disciplinaires est ponctuellement négociée et gérée, sans besoin qu'un modèle mathématique global uniformise formellement cet interfaçage.

De même, dans le programme de microsimulation complexes des marchés financiers (Solomon & Levy, 2003), les approches à agents permettent d'aller au-delà des réductions traditionnelles à la physique statistique propre à l'économie mathématique, économie mathématique originellement pressée d'*aller aux théorèmes* faute d'instruments computationnels suffisamment souples et riches.

Avec une telle complexification des modèles locaux, on retrouve cependant le problème du savoir théorique ou même pratique que l'on peut immédiatement en tirer. Ces modèles permettent souvent de tester des hypothèses de mécanismes valant localement. Mais il n'est pas certain qu'ils soient eux-mêmes intégrables dans

¹ Cette pratique caractérisait la première époque de l'ère des modèles, ère dans laquelle nous sommes depuis l'après-guerre. Voir Varenne, F., *Du modèle à la simulation informatique*, Paris, 2007.

² Varenne (2007).

³ Varenne (2008).

⁴ Voir (Guérmond, 2005), (Sanders, 2006). Cette approche se développe aussi depuis quinze ans au moins en modélisation pour l'environnement : voir Ferrand (1999).

des systèmes de modèles dont les objets cibles seraient à échelle plus large et plus globale. La diversité des significations disciplinaires des symboles formels qu'ils mobilisent et la multiplicité des ancrages qu'ils permettent avantagement de maintenir peuvent en contrepartie les éloigner d'une pensée globale, pensée qui rendrait en retour capable d'une action locale. On retrouve alors la tentation de la simplification.

3- La tentation de la simplicité

Parfois en effet, après une phase où le système de modèles, y compris à objet local, peut devenir une sorte d'« usine à gaz », on observe un appel à la simplification. Cette simplification peut opérer par remathématisation d'un système de simulation complexe déjà disponible et stabilisé, comme ce fut le cas pour les modèles de simulation de croissance de plantes¹. Mais, souvent aussi, elle est invoquée dès le départ au travers d'une épistémologie explicitée par les modélisateurs eux-mêmes.

Simplification pour la praticabilité

Comme cela a été rappelé plus haut, le rapport du GIEC de 2007 reprend la même argumentation que celui de 2001 au sujet de l'impraticabilité des calculs dans le cas où le modèle est trop détaillé. Dans un autre passage cependant, ce rapport du GIEC fait remarquer aussi que la recherche de simplicité a d'autres raisons : les modèles plus économes en calculs ne sont pas seulement plus faciles à calculer pour un ordinateur, mais ils permettent de ce fait une exploration plus approfondie de l'espace des paramètres. Avec eux, on peut multiplier les simulations tests sur des jeux de paramètres très nombreux. On produit alors par là des analyses de sensibilités qui permettent de mieux comprendre la réponse globale du modèle. La praticabilité n'est donc pas seulement celle du calcul mais celle de la compréhension. La compréhension devient en revanche très indirecte voire absente dans le cas d'un modèle trop détaillé.

Ce n'est pas toujours un problème en soi que l'on ne comprenne pas ce que fait un modèle traité par un ordinateur. Cependant, si l'on n'a aucune idée, aucune intuition, même vague, des processus d'ensemble que les computations qu'il met en scène permettent, il devient très difficile de vérifier 1) que l'implémentation du modèle dans l'ordinateur s'est faite sans erreur, 2) que ce qui s'y passe, à supposer qu'il n'y ait pas d'erreur dans cette implémentation, est réellement pertinent pour ce que l'on cherche à expliquer, explorer ou prédire dans le système cible au moyen du modèle. Bref, la question de la validation du modèle devient extrêmement complexe.

Simplification pour la compréhension et pour l'identification des paramètres

C'est face à ce problème de la validation des modèles complexes à agents, notamment en sciences sociales, qu'un certain nombre de modélisateurs recourant aux simulations informatiques ont très vite prôné une approche dite KISS : *Keep It Simple, Stupid* !² C'est un mot d'ordre (ou pense-bête) qui signifie quelque chose comme « *maintiens-le simple, idiot !* ». D'après cette approche, une fois qu'ont été prises en compte les attentes

¹ Varenne (2007), (2008), (2009a).

² Voir Axelrod (1997).

précises des modélisateurs, les agents informatiques qui interviennent dans le modèle doivent être choisis les plus simples (il n'y a pas de connotation négative ici : ils doivent ne pas être intelligents ou le moins possible¹). Pour Axelrod, en effet, si on suit cette stratégie, les résultats des simulations seront plus faciles à interpréter. D'autre part, les paramètres des agents seront plus faciles à identifier. C'est-à-dire qu'ils seront plus faciles à évaluer numériquement au regard des données, données souvent plus rares et plus lacunaires en sciences sociales qu'en sciences de la nature. Enfin, la validation de la simulation sera ensuite plus aisée. Au contraire, si on complexifie à l'excès les agents et qu'on multiplie pour cela le nombre de leurs paramètres, on multiplie le nombre de combinaisons possibles de leurs paramètres et on construit ainsi une structure de modèle paradoxalement plus universelle : le fameux problème de la sous-détermination du modèle par les données sera donc amplifié au lieu d'être réglé².

D'autres modélisateurs en sciences sociales computationnelles contestent ce choix contraignant. Ils considèrent qu'il ne faut pas reculer devant la possibilité qui nous est effectivement donnée, avec les progrès de l'informatique, de complexifier les agents formels simulant les agents sociaux réels. Leur idée est que, si on ne rend pas plus réalistes ces agents³, les arguments que l'on pourra tirer de ces modèles locaux simplifiés resteront purement de l'ordre de l'exploration conceptuelle. Et ils ne serviront nullement à tester des hypothèses explicatives suffisamment crédibles en termes de stratégie réaliste d'acteurs interagissant, vivant en société et dans un environnement évolutif. *A fortiori*, ils ne pourront servir à la décision et à l'action locales éclairées.

4- La tentation de la généralité

La problématique du changement d'échelle est abordée frontalement par ce qu'on appelle parfois la science de la complexité⁴. Dans cette perspective, par exemple, de manière à éviter le problème de la sous-détermination du modèle par les données, on considère qu'il faut chercher à spécifier non tel ou tel modèle mais des modèles génériques. Par là, on fait en sorte que ce soit des genres de comportements de modèles, et donc finalement des genres de modèles ou modèles génériques, qui soient mis en face de genres de comportements de données. Une fois que cette conformation aura été accomplie, on saura que le modèle mathématique simple et générique aura capté ce qui est nécessaire et suffisant pour rendre compte des données.

Cependant la recherche mathématique directe de ce genre de modèle conduit à une stylisation des faits naturels, humains et sociaux qui est imposée de l'extérieur de la discipline, à savoir par la pratique mathématique elle-même : cette stylisation perd donc vite la signification disciplinaire et donc aussi la référence au réel détectable ou observable que la discipline met pourtant déjà en jeu d'elle-même dans ses propres concepts, que ce soit en science sociale ou en science de la nature. Contrairement à ce qu'un certain nombre de théoriciens

¹ C'est-à-dire avoir une représentation la plus minime de leur environnement, avoir pas ou peu de capacités d'anticipation (de modélisation), peu ou pas de modèle social, peu ou pas d'intelligence sociale (*i.e.* pas de capacité à se relier aux autres à travers des représentations d'autrui, des imitations ou des anticipations de leurs actions). Voir (Ferber 1995) sur ces différences.

² Un modèle calibré et qui prédit correctement les faits est-il pour autant une bonne image du processus qui se produit dans le système cible ? Pas nécessairement. Voir à ce sujet : Amblard, Bommel & Rouchier *in* Phan & Amblard, 2007, p. 100.

³ En prenant en compte leur intelligence sociale, comme le demande R. Conte (2000), par exemple ou leur capacité de structurer leur action et de faire émerger des institutions comme le rappelle Gilbert (1996, 2007, 2008).

⁴ Suivant en cela l'exemple de Paul Bourguin, je distingue ce qui se nomme pompeusement science de la complexité de cette nébuleuse des sciences des systèmes complexes qui, quant à elles, se retrouvent non pas face à des solutions communes abstraites, mais plus modestement face à des questions formulées au moyen de concepts qui se sont révélés communs (comme l'émergence, l'auto-organisation, la causalité descendante...).

affirmant, une telle stylisation semble ne pas avoir plus de lettres de créance *a priori* que les paramétrisations *ad hoc* des numériciens des premiers modèles globaux de changement climatique : que l'on stylise pour le calcul (stylisation pratique) ou pour comprendre (stylisation théorique), le forçage conceptuel demeure¹.

Si l'on adopte cette perspective abstraite et finalement optimiste, il est d'ailleurs très difficile de comprendre la différence entre les hiérarchies que nous avons pourtant mise en lumière précédemment : la dégradation d'un modèle global ne rejoint pas nécessairement un modèle constructiviste ou *bottom-up* précisément parce que, contrairement aux apparences, les deux n'appartiennent pas à la même hiérarchie de modèles. Un modèle global détaillé ne fournira pas nécessairement un lien direct avec un modèle local. Le mathématisme dont souffrent parfois ces approches *a priori* empêche en réalité de voir la diversité et l'irréductibilité des fonctions dénotationnelles² des systèmes de symboles (fussent-ils formels) employés dans les modèles des sciences de la nature et de la société.

5- La tentation du « langage des frontières »

On peut dès lors se livrer à un relativisme généralisé et dire que tous les modèles, même les plus théoriques, ont simplement pour fonction de faire dialoguer les disciplines. Gunnen (2009) affirme cependant qu'une telle absence de théories n'expose pas nécessairement les sciences de l'environnement au risque d'un relativisme postmoderne. Selon lui, ceux qui le pensent commettent une erreur de catégorie : ils ne distinguent pas le pluralisme culturel, qui « convient au penseur mondain détaché de l'action », et le pluralisme méthodologique, avéré et fécond en sciences de l'environnement et de la société. Ce dernier pluralisme incite au contraire au pluri-perspectivisme, c'est-à-dire à la multiplication des modes d'accès à ce qui apparaît, de fait, bien réel, au cours de l'enquête scientifique³.

Cependant, on ne peut nier que la nécessité d'intégrer de plus en plus de sous-modèles d'origines disciplinaires variées dans des modèles globaux a créé une tension épistémologique inédite. Le problème le plus souvent souligné tient au fait qu'à une époque de spécialisation croissante des disciplines, cette injonction à travailler de nouveau ensemble est venue directement contrecarrer le cours habituel de nombre de disciplines. Les épistémologues et les sociologues des modèles, surtout, ont étudié cette question et ils ont trouvé diverses solutions interprétatives, souvent d'inspiration relativiste. Une grande partie d'entre eux a noté, à juste titre, qu'on ne pouvait pas dire qu'il y avait une ontologie réellement partagée derrière ces modélisations complexes et

¹ Concernant le forçage occasionné par la stylisation théorique, on peut mieux le comprendre si on rappelle qu'un niveau d'organisation (mobilisant des concepts disciplinaires, biologiques, sociologique, etc.) n'est pas une échelle (mobilisant des quantités physiques). Or, quand un biologiste théoricien ou un sociologue théoricien recherche des invariances d'échelles pour penser les organisations vivantes ou sociales, ou les deux à la fois, il lui paraît souvent difficile d'échapper à l'hypothèse physicaliste minimale imposant de réifier soit le temps, soit l'espace. Ce n'est sans doute pas une erreur en soi que de chercher, à terme, à physicaliser les sciences du vivant, mais le danger, qui revient sans cesse, est de le faire prématurément en faisant d'abord abstraction du savoir disciplinaire déjà disponible et accrédité sur les organisations vivantes, humaines et sociales. Le modèle d'une science comme la physique théorique, directement mathématique dans ses constructions de concept, fascine toujours ; mais il reste apparemment inaccessible dans les sciences à objets complexes.

² On entend par *fonction dénotationnelle* - ou de dénotation - d'un symbole ou d'un système de symbole la propriété qu'il possède non pas d'avoir un sens et, par là de renvoyer à une représentation mentale, mais de renvoyer directement à un aspect, à un objet ou à une classe d'objets du monde. Voir la définition de *sémantique référentielle* dans (Recanati, 2008), p. 29. Voir surtout l'utilisation fondatrice de cette notion et de son adjectif (dénotationnel), dans le contexte d'une théorie générale des symboles, dans Goodman (1968, 1981). Pour Goodman, que nous suivons ici (comme précédemment dans Phan & Varenne, 2010), la relation de *référence* est un « terme général couvrant toutes les formes de symbolisation », et la *dénotation* est plus particulièrement « l'application d'un mot ou d'une image ou de tout autre label à une ou plusieurs choses » du monde réel ou fictif.

³ Voir Gunnen (2009), pp. 290-291.

interdisciplinaires, mais qu'on pouvait *a minima* considérer cette pratique d'intégration comme analogue à une pratique de dialogue ou même simplement de recherche d'un langage commun, d'un langage frontière.

Cependant, sur le terrain, on observe que les scientifiques eux-mêmes s'interrogent eux aussi, souvent sur des bases plus précises : car il y a, pour eux, une nécessité à faire explicitement émerger la question du type de connaissance précis que peut apporter ou non une interdisciplinarité devant des objets complexes. Leur questionnement est alors le suivant : dans l'attaque d'un problème commun et multidimensionnel (et où interviennent natures et sociétés), peut-on espérer qu'il y ait des objets interdisciplinaires, des méthodes interdisciplinaires, ou même seulement des approches interdisciplinaires ? Dans la littérature scientifique, les réponses varient en fonction de l'objectif qui est conféré initialement au modèle intégré. Pourtant, cet objectif lui-même, loin d'être de pure circonstance, est en fait souvent commandé par l'origine disciplinaire propre et les choix épistémologiques associés de ceux qui, majoritairement, rendent compte *in fine* de cette approche interdisciplinaire en la publiant.

Le problème est que l'idée selon laquelle les modèles intégrés ne sont que des occasions de développer des langages frontières est déjà en partie contrecarrée par la tendance irrésistible à la complexification des modèles, à l'ajout de détails et de paramétrisations de plus en plus réalistes. La tendance des modèles intégrés à n'être déjà plus les produits d'un ou deux laboratoires spécialisés mais d'un consortium de laboratoires, au niveau mondial, tend à accréditer l'idée que, comme pour les « omiques » de la biologie (génomique, protéomique...), le couplage croissant des modèles climatiques avec des modèles géophysiques, économiques, sociologiques, écologiques, incite à une entrée définitive de cette pratique de modélisation dans un format de science déjà connu en physique fondamentale (avec le CERN, par exemple) : la *Big Science*. Dans ce cas, il ne suffira plus de langage commun pour poser directement des questions sur ce que l'on a ensemble représenté et sur ce que l'on peut faire. Car, intégrer des savoirs disciplinaires distincts, ce n'est pas seulement apprendre à parler, dans un même « créole »¹, du même objet, ni apprendre à utiliser partiellement les mêmes méthodes, c'est aussi, plus profondément, accepter que le statut épistémologique du modèle construit collectivement aura le même sens pour chacun des contributeurs. C'est à ce niveau-là qu'une épistémologie de la co-construction et donc de la confiance, ou de la déférence *via* un langage créole, atteint ses limites, y compris entre experts de disciplines différentes.

6- Les limites de la déférence en régime computationnel : pour une nouvelle épistémologie de la référence

On l'a évoqué : une des questions majeures qui se posent actuellement est celle de savoir s'il est possible de coupler valablement des modèles locaux pour élaborer des modèles globaux contenant réellement des savoirs accrédités et pas seulement des paramétrisations *ad hoc*. Un certain nombre de scientifiques considère ainsi qu'un modèle local est non seulement local mais qu'il est aussi individuel. Il est individuel au sens où il est le modèle d'une situation purement singulière : avec des sols particuliers, des espèces vivantes particulières, une implantation et des productions humaines spécifiques, etc.

¹ Selon l'expression de l'historien des sciences Peter Galison (1997).

La question de son couplage se double donc de la question, différente, de savoir si les concepts et les méthodes qu'il déploie, et donc la compréhension et la prise sur le réel qu'il permet, peuvent valoir aussi pour d'autres régions. Guillemot (2007) expose ainsi le problème :

Les paramétrisations devraient en principe être universelles ; or, il arrive souvent qu'une paramétrisation convienne pour une zone géographique et pas pour une autre. Les processus physiques sont certes les mêmes partout, mais les processus dominants diffèrent selon les circonstances ; ainsi, les facteurs essentiels de la convection ne sont pas identiques pour la mousson indienne et pour la mousson africaine. Pour rendre une paramétrisation plus universelle, on sera conduit à accroître son « réalisme » et finalement sa complexité.¹

À moins de complexifier encore considérablement la représentation des phénomènes à petite échelle, et donc à condition de s'appuyer sur un savoir disciplinaire le plus affûté, l'enseignement que donne un modèle local semble ne pouvoir être que singulier. En conséquence, cela pose la question du caractère trop optimiste des réseaux de zones ateliers, par exemple : si leurs approches sont irréductiblement singulières, ces ZA peuvent-elles vraiment s'instituer en réseaux, c'est-à-dire dialoguer et s'échanger des méthodes ou même des résultats ? Ce que l'on comprend finement, à l'échelle locale, peut-il être reconnecté avec ce que l'on comprend ailleurs et proposer par là du sens ? Et complexifier à l'extrême, dans ce but, n'est-ce pas renoncer à comprendre ?

On retrouve ici l'opposition, qui peut effectivement toujours réémerger en pratique, entre prédire – ou reproduire - et comprendre. Ainsi que le note Kandel (2002), par exemple, au sujet de ces modèles complexes, « leur complexité croissante en rend le fonctionnement de moins en moins transparent »². Ce dernier se demande même s'il ne faudrait pas espérer trouver quelques lois macroscopiques exactes qui permettent de comprendre de nouveau les modèles que l'on manipule. Le Treut et Jancovici (2004) sont plus optimistes et font un diagnostic légèrement différent au sujet de cette impérieuse nécessité de complexifier qui a en même temps pour effet de paralyser notre faculté de compréhension. Pour eux, cette opacification des modèles est le plus sûr signe - négatif si l'on veut - qu'ils captent bien mieux le réel que les modèles antérieurs. Car comme le réel n'est pas lui-même prévisible même si ses processus sont explicables³, et cela du fait des phénomènes de chaos déterministe qui s'y produisent⁴, on retrouve dans ces modèles détaillés la sensibilité aux conditions initiales qui fait que, justement, il est impossible de prévoir le temps qu'il fera une journée précise, à un endroit précis, dans 50 ans. Ainsi, pour Le Treut et Jancovici, « l'incertitude qui accompagne leurs prédictions reflète de moins en moins l'ignorance des scientifiques, et de plus en plus le fait que le monde réel demeure en partie imprévisible. »⁵ Ces modèles sont opaques précisément parce qu'ils reflètent mieux le réel qui est partiellement mais intrinsèquement imprévisible. Que faire alors de ces modèles complexes au comportement imprévisible s'ils collent si bien au réel ? Le Treut et Jancovici répondent que l'on peut les traiter de manière statistique, en réitérant leur simulation et en modifiant légèrement les valeurs des paramètres à chaque fois. On obtient alors un espace d'évolution du modèle qui permet de désigner les points de brusque changement. Ce sont alors ces comportements statistiques sur lesquels on peut ensuite compter pour évaluer la crédibilité des scénarios que l'on se propose d'évaluer. Cela suppose

¹ Guillemot (2007), pp. 101-102.

² Kandel (2002), p. 96.

³ C'est la base même de l'idée de chaos déterministe : un phénomène réductible et explicable, non émergent en ce sens, mais qui ne donne pas pour autant la possibilité d'une prévision calculable.

⁴ Voir Gassman (1996), p. 79 : « Un comportement chaotique limite la période de prévision [...] Ainsi, la répétition d'un même calcul peut conduire à un résultat totalement différent, à partir de conditions initiales ou de valeurs de paramètres seulement légèrement différentes ».

⁵ Le Treut & Jancovici (2004), p. 94.

cependant que l'on modifie le regard épistémologique que l'on a sur le modèle : un tel modèle de simulation doit bien entendu avoir la fonction d'une *expérimentation virtuelle* et non celle d'une aide à la *compréhension*. C'est bien aussi en ce sens que Solomon et Lévy (2003) conçoivent leurs *modèles complexes de microsimulation de marchés financiers*. Ce serait donc une erreur manifeste de demander à de tels modèles de simulation ce pour quoi ils ne sont pas conçus : aider directement à comprendre. Si l'on songe que la capacité de compréhension et de symbolisation traitable par l'esprit humain est largement limitée, pourquoi faudrait-il d'ailleurs qu'elle serve d'étalon universel, d'issue indépassable, pour toute entreprise scientifique de traitement de systèmes de symboles dénotant des aspects du réel ? Pourquoi ne pourrait-on pas déléguer à une machine cette computation sur des symboles ? Et, alors même qu'on l'accepterait, pourquoi encore se forcer à concevoir une telle *expérimentation virtuelle* nécessairement sur le modèle d'une « expérience de pensée » continuée comme c'est encore bien souvent le cas ? Ce faisant, on plaque encore une grille anthropomorphique sclérosée sur des processus cognitifs et de dénotation ouverts et interactifs.

Comme pour accentuer ce constat que chaque région terrestre, chaque écosystème, présente cette forme singulière dont nous parlions, le biologiste Lewontin souligne que les êtres vivants construisent leur environnement tout autant qu'ils l'habitent : en cela, ils accroissent encore la singularité des écosystèmes locaux. Ce que Lewontin appelle la triple hélice (entre les gènes, l'organisme et l'environnement) devra donc aussi être pris en compte pour mesurer l'apport des modèles locaux. Ce n'est donc pas un hasard si, dans ce même livre, Lewontin est assez pessimiste sur notre maîtrise des changements globaux. Il pense qu'on ne peut empêcher les changements d'environnement ou les extinctions d'espèces : l'intrication qu'il décrit, à l'échelle locale, montre qu'un écosystème complexe ne peut pas faire l'objet d'une maîtrise mais seulement d'une observation, peut-être d'une inflexion, en tout cas d'abord d'une adaptation de notre part¹.

De son côté, lorsque l'économie est convoquée pour contribuer à l'élaboration de modèles d'évaluation intégrés, elle semble garder plus que jamais la fonction normative qui a toujours été la sienne : en l'espèce, nous aider à déterminer quelle devra être notre action pour permettre à tout le moins un développement soutenable. Mais, comme le remarque Vivien (2009), la persistance du caractère très stylisé (et donc à objet cible universel) des modélisations propres aux modèles de l'orthodoxie néo-classique fait qu'il semble que l'on soit maintenant devant une alternative contraignante :

D'un côté, une science économique standard qui, en raisonnant dans le cadre de mondes stylisés et en adoptant une posture d'ingénierie sociale, entend construire une décision optimale à grand renfort de calculs et d'équations ; de l'autre, une économie politique, préoccupée désormais de questions écologiques, confrontée à la complexité du monde et aux luttes que s'y livrent des pouvoirs et des intérêts contradictoires, qui veut contribuer à la recherche de compromis institutionnalisés traduisant la reconnaissance de limites environnementales.²

L'alternative serait donc la suivante : soit on cherche des modèles fondés sur des concepts à l'applicabilité suffisamment universelle pour donner lieu à des calculs, et ainsi à une ingénierie sociale, soit on conteste la possibilité de cette universalité et, assez logiquement, on ne peut s'expliquer que la reconnaissance de la complexité du monde amène à produire des savoirs communs ou des pratiques communes, sauf à supposer qu'ils émergent de longs processus où la confiance et la défiance entre experts, entre experts et décideurs, le disputent aux jeux de pouvoirs et aux maximisations des intérêts de chacun.

¹ Lewontin, R. (2003), pp. 82-83.

² Vivien (2009), p. 82.

Devant la complexification des représentations qui se manifeste aujourd'hui à la fois par la complexification des modèles intégrés et par la multiplication des modèles locaux singuliers, il est assez normal que, dans un premier temps, une épistémologie de la déférence se développe et prenne le pas sur une épistémologie de la référence. Les experts, désormais eux-mêmes en situation d'interdisciplinarité, sont apparemment obligés de déférer auprès de leurs collègues d'autres disciplines. Or, comme on peut le comprendre, c'est cette confiance épistémique qui est ensuite soumise à rude épreuve quand des enjeux politiques et sociétaux lourds sont directement associés à ces représentations construites collectivement¹.

Cependant, si l'on prend aujourd'hui la réelle mesure des nouvelles capacités propres aux modélisations computationnelles et aux simulations informatiques complexes associées, en particulier en sciences sociales, il est possible de voir que nous ne sommes pas nécessairement condamnés à cette simple alternative. Car les modèles de l'économie changent. Le tournant computationnel a précisément pour effet de subvertir les modes classiques de stylisation trop simples (car orientés mathématiques et immédiate compréhension) qui sont propres à l'orthodoxie économique. Au contraire du régime austère que fait subir aux concepts et aux observables d'une discipline empirique le forçage d'une formalisation mathématique classique, dans ses modèles, l'approche computationnelle permet la multiplication des modes de dénotation des phénomènes cibles au moyen de systèmes de symboles hétérogènes : on a alors affaire à une formalisation plus souple des phénomènes physiques, humains et sociaux. Bien entendu une littérature considérable existe qui se pose le problème de savoir quels sont les statuts épistémiques de ces modes nouveaux de formalisation assistés par ordinateur².

Cette formalisation plus souple permet de représenter simultanément plusieurs échelles d'un même système : dès lors, des sous-modèles adaptés aux phénomènes ayant lieu à chacune de ces échelles peuvent simultanément être calculés. Toutefois, même si les données peuvent venir de plusieurs échelles, l'approche traditionnelle consiste à valider le modèle par rapport à une seule échelle d'observation. L'objection du caractère *ad hoc* des sous-modèles ou de la sous-détermination du modèle par les données peut donc rejaillir, dans ce cas de figure. Depuis peu, cependant, certains modélisateurs en sciences sociales utilisant des modèles à agents ont développé la technique dite de validation croisée (*cross-validation*) : il s'agit de valider le modèle computationnel aussi bien à l'échelle micro qu'à l'échelle macro³. À l'échelle micro, le sous-modèle ne peut pas simplement être conçu comme un ajustement aux données ou comme une paramétrisation (comme les disent les climatologues). En sciences sociales, de telles approches à agents permettent de simuler de manière réaliste, hétérogène et évolutive les véritables interactions entre acteurs. Neumann (2009) souligne ainsi que c'est une caractéristique de ces approches qui les distingue de manière cruciale du modèle de l'acteur au sens de la théorie économique néo-classique⁴. L'acteur de la théorie économique ne dispose pas d'une telle variété d'interaction. J'ajouterai que cela les distingue aussi fondamentalement des approches apparemment plus individus centrées de la théorie des jeux⁵, dès lors que, le plus souvent, cette dernière cherche encore à mathématiser les relations

¹ Un certain nombre de travaux font état de cet essor d'une épistémologie de la confiance. Voir par exemple : Origi (2004) et Origi (2008).

² Voir par exemple : Treuil *et al.* (2008) ; Squazzoni (2009) ; JASSS (2010).

³ Voir M. Neumann (2009). Voir aussi Edmonds (2007), Edmonds & Moss (2001, 2005), Moss & Edmonds (2005).

⁴ Neumann (2009), p. 81.

⁵ Ses concepts souvent grossiers et à faible nombre de dimensions significatives, du point de vue de la variété des notions mobilisées par les sciences humaines et sociales, lui permettent de valoir pour des situations très stylisées, et surtout en fait pour l'exploration conceptuelle. La performance du livre remarquable de Giraud (2000), qui parvient à ne mettre quasiment aucune équation dans un livre de 400 pages sur la théorie des jeux, confirme plutôt cette idée qu'il y a continuité entre le discours théorique de format verbal, en cela immédiatement accessible à notre compréhension, et les équations mathématiques de la théorie des jeux.

dénotées entre des individus hautement stylisés et homogénéisés pour les besoins du calcul¹. C'est pourquoi les discrétisations qu'elle propose permettent au mieux des intuitions intellectuelles², mais pas la captation d'un terrain empirique effectivement observé et mesuré.

Dans le même ordre d'idée que l'approche technique par la validation croisée, dans (Phan & Varenne, 2010), nous avons proposé les fondements d'une épistémologie des modèles complexes et modulaires grâce à laquelle il est possible d'explicitier et formuler rigoureusement les voies de la référence chaque fois employées pour chacun des différents systèmes de symboles mis en œuvre dans un modèle³. Les notions distinctes d'expériences de simulation *sur et par* modèles complexes y sont notamment clarifiées. L'idée qui sous-tend ce travail est qu'à l'heure de la complexification des modèles intégratifs, on ne peut plus se satisfaire de dire que de tels modèles sont des lieux de dialogues. Dans ce contexte, on doit en effet reconnaître la faiblesse, l'imprécision et l'ambiguïté du modèle de la pratique langagière humaine, de son anthropomorphisme principal bien discutable, de manière à éviter de la plaquer de nouveau sur des procédures épistémiques très fines, déléguées certes aux machines, mais qui ne perdent pas pour cela de leur précision ni de leur objectivité. Le caractère de nouveau (relativement) iconique des symboles intervenant dans les modèles computationnels, à la différence des modèles mathématiques traditionnels, permet de réhabiliter, dans ce contexte une épistémologie de la référence au détriment d'une pure épistémologie de la déférence. Cette référence reste relative à un engagement ontologique partagé par les concepteurs et utilisateurs du modèle complexe. Mais l'épistémologie appliquée et discriminante que nous proposons donne justement les outils permettant d'explicitier universellement cet accord sur l'ontologie⁴.

Conclusion

Il n'est pas possible de s'étendre davantage sur la solution technique que nous proposons pour cette épistémologie appliquée et de terrain. Rassemblons ici simplement les fils de notre réflexion. Nous avons constaté une tendance à la complexification des modèles globaux. Nous avons observé aussi une tendance à la multiplication des modèles locaux, avec la question de savoir si ces modèles peuvent réellement enseigner quelque chose au-delà de l'échelle locale qui est la leur. Nous avons vu que l'intégration de sous-modèles détaillés, de plus en plus fondés sur des savoirs disciplinaires précis, dans des modèles globaux, avait pour contrepartie de nous mettre en face 1) du problème de l'opacification du modèle aux yeux de notre capacité de synthèse et de compréhension non aidée par ordinateur, 2) du problème de la sensibilité aux conditions initiales souvent supposée présente dans le monde « réel », 3) de l'évolution du statut épistémique de ces modèles

¹ À travers ces conflits de méthodes en économie, on perçoit aussi les tensions académiques et les jeux de pouvoirs plus larges qui se jouent actuellement entre les informaticiens et les mathématiciens appliqués. Une des conséquences des tournants computationnels des sciences contemporaines est le renversement académique progressif de la hiérarchie entre informatique et mathématique. Dans les années 1960, l'informatique avait un rôle ancillaire pour les mathématiques appliquées ; ce sont aujourd'hui les mathématiques qui tendent à avoir un rôle ancillaire pour l'informatique. Les mathématiques proposent aujourd'hui des techniques pour vérifier la robustesse de certains programmes, analyser la sensibilité de certains modèles computationnels complexes. Elles arrivent parfois à la fin du processus de modélisation et non au début, comme dans les entreprises de simplification par remathématisation de simulation, par exemple. Voir Varenne (2007), (2008).

² Ce que le rapport McMorow (2009) appelle des « insight models ».

³ Voir Varenne (2010a) et (2013).

⁴ Bien qu'avec des concepts distincts, le travail récent d'Annamaria Carusi (2008) va dans le même sens. Elle se propose de fonder de nouveau la confiance épistémique dans une faculté du sujet connaissant lui-même et non simplement dans le contenu de ses croyances. Elle la fonde pour cela sur une catégorie de jugements *a priori* partageables (esthétiques, en l'espèce), jugement que nous exerçons face aux visualisations auxquelles donnent souvent lieu les simulations computationnelles.

intégrés, de lieux de dialogue qu'ils furent d'abord, vers des objets d'expérimentation complexes et diversement instrumentés (avec notamment la recherche de modèles simples sur ces simulations de modèles complexes) qui justifie que l'on parle de laboratoires virtuels et pas seulement d'explorations conceptuelles immédiatement traduisibles de manière verbale. Il faut en particulier prendre en compte le fait qu'un modèle intégré peut avoir tantôt un statut épistémique unique pour l'ensemble des disciplines qui y ont contribué, tantôt un statut épistémique variable pour chacune. Ce statut variable se détermine de manière complexe en rapport à la fois avec la nature et la forme des connaissances disciplinaires intégrées et avec le statut épistémique résiduel que possède, du point de vue de la discipline, tout le contexte de modélisation qui ne relève pas de cette discipline. Devant un tel défi épistémologique, il ne faut pas renoncer au travail de fondation d'une épistémologie appliquée, réellement riche et discriminante sur ces nouvelles formes de modélisation¹.

Remarquons, pour finir, que, dans un modèle multi-échelles, le problème de la sensibilité aux conditions initiales devient en partie celui de la sensibilité aux échelles inférieures. On retrouve ainsi une question qui mobilise actuellement la communauté des sciences sociales computationnelles : celle de l'émergence dans les modèles computationnels. Il y a émergence dans un modèle à agents lorsque les interactions entre agents donnent naissance à une forme de comportement collectif, observable à l'échelle du groupe, et que cette forme n'est pas anticipable formellement à partir de la seule formulation des attributs et des règles du comportement des individus². La question principale qui se pose est celle de savoir si l'émergence computationnelle capte vraiment les caractéristiques des phénomènes naturels et sociaux émergents³.

Lorsque l'économie s'interroge aujourd'hui sur son incapacité à prédire des événements singuliers, des catastrophes⁴, lorsqu'elle se demande s'il ne faut pas cesser de penser en moyenne⁵ et en termes de coûts-avantages dès lors que donner une probabilité *a priori* à une catastrophe climatique n'a pas de sens⁶, elle est en partie face à des questions d'émergence de ce type dans des modèles complexes intégrés. Au regard des débats épistémologiques de fond que lancent aujourd'hui les sciences computationnelles, notamment sur l'émergence, ce n'est sans doute pas simplement d'une rénovation de ses concepts et de ses métaphores dont l'économie semble avoir besoin, mais probablement aussi d'une rénovation complète de ses objets et de ses formalismes. La tendance à la *relocalisation* des modèles intégrés eux-mêmes doit aussi faire réfléchir à la place fondamentale que la géographie tendra à jouer bientôt dans les sciences sociales, ces sciences qui, dans leur versant computationnel, n'opposent plus aussi simplement et unilatéralement qu'avant l'idiographique et le conceptuel⁷. De même que l'informatique contemporaine joue à déconstruire les mathématiques appliquées mais aussi à les rénover en retour, il se pourrait bien que la *géographie computationnelle* contribue à une semblable déconstruction de l'économie mathématique classique, en la rendant enfin sensible à l'espace, à l'environnement et à leur hétérogénéité. À ce titre, ce que l'on appelle l'« économie spatiale » (Fujita, Krugman & Venables, 1999) semble aller dans le bon sens. Mais il ne suffirait pas d'un ajout à la marge : on ne plus se contenter d'un

¹ Voir Varenne (2010a) sur cette question.

² Voir une revue des travaux dans Dessalles *et al.* (2007).

³ Schmid (2009), Varenne (2009c).

⁴ Sur notre incapacité à modéliser les *événements rares*, voir le débat relancé de manière populaire par Taleb (2010) et une réponse dans McMorrow (2009).

⁵ Voir Solomon & Levy (2003).

⁶ Voir Dupuy (2002), Schubert (2009).

⁷ *A posteriori*, du point de vue de l'histoire des sciences, on pourrait dire que cette opposition tranchée était la conséquence accidentelle mais inévitable du type de formalisation alors seul disponible : les mathématiques, mathématiques elles-mêmes développées seulement à la main. Pour cette raison, les mathématiques élaborent bien souvent des dispositifs de symbolisation et de formalisation immédiatement orientés théorèmes. L'informatique quant à elle n'est pas exclusivement orientée théorèmes. Elle ajoute des attermoiments et c'est précisément ce qui permet d'assouplir et d'enrichir les dispositifs de formalisation qu'elle propose. Voir Varenne (2009b).

énième épicycle sur un système ptolémaïque moribond¹. Le tournant computationnel est donc peut-être une chance à saisir pour les sciences sociales. Car il autorise enfin ceux qui auront suffisamment d'audace académique à ne pas nécessairement partir des projections anthropomorphes prématurées traditionnelles et réductrices (comme le paradigme du *langage* ou le paradigme moniste de l'*échange*, matériel ou symbolique²).

On lit parfois que la sensibilité aux événements rares, aux hétérogénéités, pourrait être uniformément prise en compte par des approches mathématiques nouvelles de type fractales ou invariance d'échelles (Taleb 2010). Mais on retrouve ici la *tentation de la généralité*. Au même titre que les modèles « grilles de lecture » de l'analyse statistique, ces approches mathématiques hétérodoxes offrent certes des modèles précieux et inédits ; mais ce ne sont pourtant que des modèles *analytiques*. Ils *mesurent* des aspects, des dimensions, comme le font les dimensions fractales. Ils donnent quelques idées claires sur des aspects généraux mais partiels de comportements de systèmes. Ils donnent ainsi des concepts pour qualifier et classer, dans les grandes lignes, des types d'évolution de systèmes complexes, vus d'un certain point de vue seulement. Mais ce ne sont pas, en ce sens, des modèles de *synthèse*. Et ils ne permettent donc pas des *expérimentations virtuelles réalistes*, mais seulement des *explorations conceptuelles* d'idées théoriques. À côté de leurs aspects exotiques, leur développement consolide donc en fait un point de vue épistémologique assez traditionnel sur les formalisations dans les sciences empiriques : on formalise pour généraliser et comprendre, point final.

L'approche computationnelle, quant à elle, n'est pas une panacée. Mais, elle permet autre chose : à ce titre, elle donne lieu à une réelle *innovation épistémologique*. Car, dans bien des sciences, elle permet d'échapper aujourd'hui en partie, et là aussi de manière inédite, aux choix conceptuels prématurés et unilatéraux des siècles passés. En sciences sociales, elle permet notamment de ne pas partir prématurément du relationnel simple, de l'informationnel concis, du seul paradigme de l'échange et de la circulation. Sans empêcher la formalisation, elle retarde un peu plus le moment totalisateur de la *mathesis* et de la prétention académique qui en général l'accompagne. Car pour qu'il y ait échange de matière, de monnaie ou d'information il faut *aussi* (mais pas nécessairement *avant* : il ne s'agit pas là de poser un fondement ou bien on ne sait qu'elle antériorité ontologique) qu'il y ait un *lieu singulier* et qu'il y ait de l'*habiter*.

Cependant, le statut des modèles construits dans cette perspective devra être chaque fois rigoureusement et patiemment défini. Or, c'est déjà une demande expresse des scientifiques eux-mêmes que l'*épistémologie elle-même* s'applique, qu'elle travaille davantage, de manière à pouvoir aider à distinguer les modes de dénotation réellement à l'œuvre dans les systèmes computationnels et à dépasser la conception généralisante et impressionniste (théorique en ce sens) qu'elle propose sinon à travers l'explication commode par la seule déférence, d'une part, et les jeux de pouvoir, d'autre part.

Bibliographie :

¹ Toutes les références critiques rassemblées par Sanders (2011) ainsi que l'analyse de l'auteur elle-même, dans son article, permettent en effet de formuler de sérieux doutes quant au caractère méthodologiquement et conceptuellement innovant de l'« économie spatiale » : une fois de plus, l'économie n'utilise cette stratégie *grand seigneur* d'ajout d'une dimension humaine supplémentaire (ici, l'espace) que pour rendre superficiellement hétérodoxes des modèles dont la fonction reste en réalité pleinement orthodoxe dès lors qu'ils restent essentiellement *orientés théorèmes* et *orientés compréhensions simplificatrices*.

² En cela, l'anti-utilitarisme contemporain ne va pas assez loin dans sa critique seulement anti-économiste dès lors qu'il travaille encore et toujours à partir du don ou du contre-don et reste par là prisonnier lui-même du paradigme circulatoire.

- Axelrod, R. (1997), « Advancing the Art of Simulation in the Social Sciences », dans Rosaria Conte, Rainer Hegselmann et Pietro Terna (dir.), *Simulating Social Phenomena*, Berlin, Springer-Verlag, 1997, p. 21-40.
- Ballot, G. & Weisbuch, G. (2000), *Application of Simulation to Social Sciences*, London, Hermes.
- Bazile D., Abrami G., Trébuil G., Le Page C., Bousquet F., Dionnet M. & Vejpas C. (2008), « Accompagner l'évolution des systèmes semenciers céréaliers au Mali et en Thaïlande », *Cahiers Agricultures*, 17 (2), pp. 210-215.
- Braillard, P.A. (2008), « Que peut expliquer un modèle complexe et peut-on le comprendre ? », in J.J. Kupiec, G. Lecointre, M. Silberstein & F. Varenne (éds.), *Modèles Simulations Systèmes*, Paris, Syllepse, 2008, pp. 89-108.
- Carusi, A. (2008), "Scientific visualisations and aesthetic grounds for trust", *Ethics and Information Technology*, 2008, 10, pp. 243–254.
- CNRS (2008) : « Zone Atelier : une plateforme de recherche sur l'environnement et les anthroposystèmes », <http://www.cnrs.fr/inee/presentation/reuDUSDE2008/Zones%20Atelier.pdf>
- Conte, R. (2000). « The necessity of intelligent agents in social simulation », in Ballot & Weisbuch, *op. cit.*, pp. 19-38.
- Conte R. & Paolucci M (2001). « Intelligent Social Learning », *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 4(1), <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/4/1/3.html> (gratuit)
- Conte R. & Paolucci M (2004). « Responsibility for Societies of Agents », *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 7 (4), <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/7/4/3.html> (gratuit)
- Dahan-Dalmedico, A. (dir.)(2007), *Les modèles du futur*, Paris, La Découverte, 2007.
- Dautray, R. & Lesourne, J. (2009), *L'humanité face au changement climatique*, Paris, Odile Jacob, 2009.
- Dessalles, J.L., Müller, J.P. & Phan, D. (2007), "Emergence in multi-agent systems:conceptual and methodological issues", in Phan & Amblard F. (2007), pp. 327-356.
- Dupuy, J.P. (2002), *Pour un catastrophisme éclairé. Quand l'impossible est certain*, Paris, Seuil, 2002.
- Edmonds, B. (2007). « Simplicity is Not Truth-Indicative ». In Gershenson, C.et al. (2007), *Philosophy and Complexity*. World Scientific, 65-80. (<http://cfpm.org/cpmrep99.html>)
- Edmonds, B. & Moss, S. (2001). « The Importance of Representing Cognitive Processes in Multi-Agent Models », in: Dorffner, G., Bischof, H. and Hornik, K. (eds.), *Lecture Notes in Computer Science*, 2130:759-766. (<http://cfpm.org/cpmrep81.html>)
- Edmonds, B. & Moss, S. (2005), « From KISS to KIDS – an 'anti-simplistic' modelling approach ». In P. Davidsson et al. (Eds.): *Multi Agent Based Simulation 2004*. Springer, *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, 3415:130–144. (<http://cfpm.org/cpmrep132.html>)
- Epstein, J. M. (2006). *Generative Social Science – Studies in Agent-Based Computational Modeling*. Princeton, Princeton University Press.
- Epstein, J. M. & Axtell, R. (1996). *Growing Artificial Societies – Social Science from the Bottom Up*. Cambridge, MIT Press.
- Ferber, J. (1995), *Les systèmes multi-agents*, Paris, Interéditions.
- Ferrand, N. (éd.)(1999). *Modèles et systèmes multi-agents pour la gestion de l'environnement et des territoires*. Paris, CEMAGREF éditions.
- Fujita, M., Krugman, P & Venables, A.J. (1999), *The spatial economy*, Cambridge, MIT Press.
- Galison, P. (1997), *Image and Logic*, Chicago, Chicago University Press.
- Gassman, F. (1996), *Effet de serre – Modèles et réalité*, Genève, Georg éditeur, 1996.
- Goodman, N. (1968), *Languages of Art : An Approach to a Theory of Symbols*, Indianapolis, Bobbs-Merrill.
- Goodman, N. 1981), "Routes of reference", *Critical Inquiry*, 8(1), pp. 121-132.
- Gilbert, N. (1996). « Holism, individualism and emergent properties », in Hegselmann *et al.* (1996), pp. 1-12.
- Gilbert, N. (2007). « Computational Social Science – Agent-based Social simulation », in Phan & Amblard (2007), pp. 115-133.
- Gilbert, N. (2008). *Agent-Based Models*, Los Angeles, SAGE Publications.
- Gilbert, N. & Troitzsch, K. (1999). *Simulation for the social scientist*. Buckingham: Open University Press.
- Giraud, G. (2000), *La théorie des jeux*, Paris, Flammarion, 2000.
- Grenier, J.Y., Grignon, C. & Menger, P.M. (2001). *Le modèle et le récit*, Paris, Editions de la Maison des Sciences de l'Homme, 2001.
- Guermond, Y. (2005), *Modélisations en géographie : déterminismes et complexités*. Paris, Hermès.
- Guillemot, H. (2007), « Les modèles numériques de climat », in Dahan-Dalmedico (2007), pp. 93-112.
- Gunnel, Y. (2009), *Ecologie et société*, Paris, Armand Colin, 2009.
- Habets, F. *et al.*, « Le développement du modèle intégré des hydrosystèmes Eau-dyssée », Rapport 2009, http://www.sisyphe.upmc.fr/piren/CDrapports/2009/4_modeles/index_1_modeles.html
- Hourcade, J.C. (2007), « Les modèles dans les débats de politique climatique : entre le Capitole et la Roche tarpéenne ? », in Dahan-Dalmedico (2007), pp. 140-164.

- IPCC (2001) : « Climate Change : IPCC Third Assessment Report », http://www.grida.no/publications/other/ipcc_tar/
- IPCC (2007) : « Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007 », http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.htm
- JASSS, 2010, Numéro spécial du *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, vol. 13, issue 1, Special section: Epistemological Perspectives on Simulation III, <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/13/1/contents.html>
- Kandel, R. (2002), « Les modèles météorologiques et climatiques », in P. Nouvel (dir.), *Enquête sur le concept de modèle*, Paris, PUF, 2002, pp. 67-98.
- Kieken, H. (2004), « RAINS : Modéliser les pollutions atmosphériques pour la négociation internationale », *Revue d'histoire des Sciences*, Tome 57, vol. 2, 379-408.
- Laloë, F. & Hervé, D. (2009). *Modélisation de l'environnement : entre natures et sociétés*, Paris, Quae, 2009.
- Legay, J.M. (1997), *L'expérience et le modèle*, Paris, INRA éditions.
- Le Treut, H. & Jancovici, J.M. (2004), *L'effet de serre : allons-nous changer le climat ?*, Paris, Flammarion, Champs, 2004.
- Lévêque, C. (2001), *Ecologie – De l'écosystème à la biosphère*, Paris, Dunod, 2001.
- Lewontin, R. (2003), *La triple hélice – Les gènes, l'organisme, l'environnement*, Paris, Seuil, 2003.
- McMorrow, D. (dir.) (2009), *Rare Events*, rapport du think-tank JASON pour le DoD, <http://www.fas.org/irp/agency/dod/jason/rare.pdf>.
- Matarasso, P. (2007), « La construction historique des paradigmes de modélisation intégrée », in Dahan-Dalmedico (2007), pp. 44-62.
- Minsky, M. (1965). « Matter, Mind and Models », *Proceedings of IFIP Congress*, 1965, pp. 45-49.
- Morgan, M.S. & Morrison, M. (eds.) (1999). *Models as Mediators*, Cambridge University Press.
- Moss, S. & Edmonds, B. (2005), « Towards Good Social Science », *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 8(4)13, <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/8/4/13.html>.
- Neumann, M. (2009), “Emergence as an explanatory Principle in Artificial Societies”, in Squazzoni, F. (ed.), 2009, pp. 69-88.
- Orcutt, G., « Simulation of Economic Systems », *The American Economic Review*, 50 (5), December 1960, pp. 893-907.
- Origi, G. (2004), « Is Trust an Epistemological Notion ? », *Episteme*, 2004, June, pp. 1-12.
- Origi, G. (2008), *Qu'est-ce que la confiance ?*, Paris, Vrin, 2008.
- Phan, D & Amblard, F. (2007). *Agent-based Modelling and Simulation in the Social and Human Sciences*. Oxford: The Bardwell Press, GEMAS Studies in Social Analysis Series.
- Phan, D. & Varenne, F. (2010), “Agent-Based Models and Simulations in Economics and Social Sciences : from conceptual exploration to distinct ways of experimenting”, *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 13(1),5, 2010, <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/13/1/5.html>
- Recanati, F. (2008), *Philosophie du langage (et de l'esprit)*, Paris, Gallimard.
- Sanders, L. (2006), « Les modèles à agents en géographie urbaine », in F. Amblard & D. Phan, *Modélisation et simulation multi-agents : applications aux Sciences de l'Homme et de la Société*, Londres, Hermès-Sciences, 151-168.
- Sanders, L. (2011), « Géographie quantitative et analyse spatiale : quelles formes de scientificités ? », in T. Martin (dir.), *Les sciences humaines sont-elles des sciences ?*, Paris, Vuibert, pp. 71-91.
- Schmid, A. (2009), “What does Emergence in Computer Simulations? Simulation between Epistemological and Ontological Emergence”, in Squazzoni (2009), pp. 60-68.
- Schubert, K. (2009), « Penser le changement climatique : la boîte à outils de l'économiste », *Regards croisés sur l'économie*, Paris, La Découverte, 2009, n°6, pp. 62-71.
- Squazzoni, F. (ed.), 2009, *Epistemological Aspects of Computer Simulation in the Social Sciences*, Berlin Springer Verlag, 2009.
- Solomon, S. & Levy, M. (2003), “Pioneers on a New Continent: Physics and Economics”, *Quantitative Finance*, 3 (1), 2003, pp. 12-16.
- Talagran, O. (2010), « Réponse à Henri Atlan », *Blog d'Hervé Le Treut*, <http://blogs.lexpress.fr/le-climatoblog/>, mise en ligne le 13 avril 2010.
- Taleb, N.N. (2010), *Le cygne noir – La puissance de l'imprévisible*, Paris, Les belles lettres, 1^{ère} édition : 2007.
- Treuil, J.P., Drogoul, A. & Zucker, J.D (2008). *Modélisation et simulation à base d'agents*. Paris, Dunod.
- Varenne, F. (2003). « La simulation informatique face à la méthode des modèles », *Natures Sciences Sociétés*, vol. 11, 2003, n°1, pp. 16-28.
- Varenne, F. (2004). *Le destin des formalismes – Pratiques et épistémologies des modèles face à l'ordinateur*. Thèse de l'Université de Lyon 2.
- Varenne, F. (2007). *Du modèle à la simulation informatique*. Paris, Vrin.

- Varenne, F. (2008). « Modèles et simulations : pluriformaliser, simuler, remathématiser », in J.J. Kupiec, G. Lecointre, M. Silberstein & F. Varenne (éds.), *Modèles Simulations Systèmes*, Paris, Syllepse, 2008, pp. 153-180.
- Varenne, F. (2009a). « Simulation informatique et pluriformalisation des objets composites », *Philosophia Scientiae*, 2009, 13(1), pp. 135-154.
- Varenne, F. (2009b), *Qu'est-ce que l'informatique ?*, Paris, Vrin, 2009.
- Varenne, F. (2009c), "Models and Simulations in the Historical Emergence of the Science of Complexity", in M.A. Aziz-Alaoui & C. Bertelle (eds), *From System Complexity to Emergent Properties*, Springer, 2009, pp. 3-21.
- Varenne, F. (2010a). "Framework for Models & Simulations with Agents in regard to Agent Simulations in Social Sciences: Emulation and Simulation", in A. Muzy, D. Hill & B. Zeigler (eds), *Modeling & Simulation of Evolutionary Agents in Virtual Worlds*, 2009, Cargèse, Corsica, pp. 49-80.
- Varenne, F. (2010b), « Les simulations computationnelles en science sociales », *Nouvelles perspectives en sciences sociales*, 5 (2), 2010, pp. 17-49.
- Varenne, F. (2010c), *Formaliser le vivant : lois, théories, modèles ?*, Paris, Hermann.
- Varenne, F. (2011), *Modéliser le social – Méthodes fondatrices et évolutions récentes*, Paris, Dunod.
- Varenne, F. (2013), « Chains of Reference in Computer Simulations », à paraître.
- Vivien, F.D., (2009), « Les modèles économiques de soutenabilité et le changement climatique », *Regards croisés sur l'économie*, Paris, La Découverte, 2009, n°6, pp. 75-83.
- Voiron-Canicio, C. (2006) : « L'espace dans la modélisation des interactions nature-société », *Actes du Colloque de la Baule sur Nature/société*, 2006, 6 pages, http://134.59.38.8/public_html/umr/spip/IMG/pdf/La_Baule.pdf