

De l'exploration conceptuelle à « l'expérience concrète » : la modélisation et la simulation multi-agents comme un « autre moyen » d'expérimenter en sciences économiques et sociales

Denis Phan^{*}

** GEMAS, UMR 8598 CNRS & Université de Paris IV -Sorbonne*

Communication aux 15^e Journées de Rochebrune, Rencontres interdisciplinaires sur les systèmes complexes naturels et artificiels : « Expérimentation et systèmes complexes », Megève, 20-26/01/2008

Cette note a pour objet de discuter la nature des activités de modélisation et de simulation *multi-agents* de systèmes complexes en sciences économiques et sociales du point de vue de l'expérimentation. A la différence de la médecine, de la biologie ou de la physique, les sciences « économiques et sociales » ne sont généralement pas considérées comme des sciences expérimentales au sens de Claude Bernard. Si la psychologie, discipline frontière, a déjà une longue tradition expérimentale, l'économie ne s'est progressivement intéressée à l'expérimentation qu'à partir de la seconde partie du vingtième siècle. L'intérêt pour l'économie expérimentale (Kagel et Roth, 1995) est longtemps resté marginal, du moins jusqu'à l'attribution en 2002 du Prix (de la Banque de Suède en sciences économiques en mémoire d'Alfred) Nobel à l'économiste Vernon Smith conjointement avec le psychologue Daniel Kahneman. Cette approche repose sur l'analyse, en particulier statistique, de données collectées lors d'expérimentations humaines contrôlées portant sur des comportements économiques individuels et/ou collectifs (les sujets sont nécessairement rémunérés relativement aux conséquences de leurs choix). L'accent est principalement mis sur la dimension empirique. Ainsi l'approche expérimentale dite des « jeux comportementaux » utilise une partie du cadre d'analyse de la théorie des jeux, mais porte sur « ce que les joueurs font effectivement » (Camerer, 2003), affaiblissant les hypothèses de l'approche analytique en théorie des jeux par la prise en compte des capacités cognitives limitées des sujets, qui sont justifiées par des conjectures cognitives et psychologiques dérivées de l'expérience.

Mais il s'agit de « l'exception qui confirme la règle » et les sciences économiques et sociales sont plus volontiers concernées par l'opposition entre « le modèle et l'enquête » (Gérard-Varet et Passeron, 1995) que par celle entre « l'expérience et le modèle » (Legay, 1997). Quelle que soit l'approche empirique en question, ces antinomies renvoient à une vision binaire idéalisée qui oppose expérience et raison, science empirique basée sur l'observation méthodique (l'enquête ou l'expérience) et approche

^{*} L'auteur remercie Frédéric Amblard, Nathalie Bulle, Franck Varenne et deux rapporteurs(s) (anonyme ?) pour leurs commentaires constructifs sur des versions préliminaires de ce travail. Une partie des arguments développés ici proviennent également d'un travail commun avec Michel Dubois (Dubois, Phan 2007), que je remercie pour m'avoir donné l'autorisation d'utiliser ces éléments argumentatifs.

conceptuelle ou hypothético déductive (le modèle). Cette polarisation oppose des méthodes - ou des approches - qui peuvent être vues comme antagonistes mais aussi comme complémentaires au sein d'une même discipline (en science physique par exemple). La simulation peut alors être vue comme occupant une position intermédiaire entre ces deux pôles. Elle peut être vue comme soit un modèle dynamique (Bulle 2005) qui « imite un processus par un autre processus » (Hartmann 1996). Mais la visée, les méthodes et les conditions de la simulation peuvent aussi être vues comme « quasi expérimentales » (Varenne, 2003). D'autres auteurs défendent des thèses qui vont dans le sens de l'expérimentation, comme Tesfatsion (2002) qui parle du « laboratoire computationnel » comme moyen de procéder rigoureusement à des « expérimentations contrôlées et répliquables ». Dans le cas des Sciences sociales, Axelrod (2005) considère que la simulation est « une troisième voie pour faire de la science », entre induction et déduction, hypothético-déductif et expérimentation. Mais la simulation est-elle finalement significativement différente de l'expérience de pensée, et n'est-elle pas qu'un prolongement de la démarche analytique de modélisation ? De plus, n'y aurait-il pas plusieurs types de simulations comme le soutiennent, avec des critères bien différents, Axtell (2000) et Varenne (2003, 2007) ? Inversement, Mäki (1992, 2002) a pu soutenir que la modélisation (économique) pouvait elle-même être vue comme une activité *quasi expérimentale*, le modèle étant selon ses termes le « laboratoire de l'économiste »... Finalement, parmi les formes de simulations, n'y a-t-il pas une spécificité de la simulation « multi-agents » (Amblard, Phan, 2006) du point de vue de l'expérimentation ? A l'évidence, le débat est loin d'être clair et de nombreuses questions préalables doivent être posées pour en clarifier les éléments. L'opposition raison / expérience n'est-elle pas fallacieuse et n'est-ce pas une affaire de degré et/ou de moment dans un processus de connaissance plus qu'une opposition binaire ? Dispose-t-on de critères pour en identifier la nature ? Il nous faut bien modéliser (au sens large) avant de simuler : modélisation expérimentation et simulation sont ainsi intrinsèquement liées ; il convient donc de préciser les termes et les fonctions de ces approches – ou « moments » de l'enquête scientifique ; au besoin d'en étudier la décomposabilité et les complémentarités, avant de saisir en quoi et dans quelle mesure ces pratiques peuvent être considérées comme « expérimentales ». Ces quelques questions sont loin d'épuiser le problème mais devraient contribuer à en clarifier les termes. Dans ce but, on insiste dans cette note sur les dimensions « explorations » et « découverte » du processus de recherche.

La première partie introduit une esquisse de caractérisation des notions de modélisation et d'expérimentation. La seconde partie propose quelques pistes sur la nature des activités de modélisation en sciences économiques (et sociales) du point de vue de l'exploration conceptuelle et/ou expérimentale. Cependant, si modèles et expériences peuvent être vus comme des formes différentes d'expérimentation, seules les expériences « réelles » portent sur des éléments du « monde réel », alors que le monde des modèles reste du domaine de l'artificiel. Mais l'expérimentation artificielle peut-elle « surprendre » comme l'expérimentation « réelle » ? La dernière partie, plus spécialement dédiée à la nature particulière des simulations « multi-agents » devrait permettre d'apporter des éléments de réponse à cette dernière question.

1. Modélisation et expérimentation

En épistémologie, jusqu'à une période récente, les modèles ont été traités comme des instruments dérivés des théories et non comme des objets autonomes. Par exemple, selon le point de vue néo-positiviste *syntactique* (Hempel-Nagel), un modèle est la reformulation d'une théorie selon le schéma : {système formel, énoncés d'observation, règles d'interprétation}. A partir des années soixante, selon le point de vue *sémantique*, un modèle est une structure d'objets (plus ou moins abstraits) qui est l'une des interprétations possibles d'une théorie. Une théorie peut être ainsi décrite par un ensemble de contraintes et de relations sur des ensembles (Ecole de Stanford), sur les espaces d'état d'un système dynamique (van Fraassen, Suppe), ou sur une structure (Ulise Moulines, 2006), que devront vérifier les modèles qui permettront en retour de l'interpréter.

Dans l'histoire des sciences, il apparaît au contraire que de nombreux modèles ont été construits pour répondre à une question, en l'absence d'une théorie préalable, ou à partir d'éléments théoriques partiels. Les Modèles sont alors des constructions conceptuelles basées sur des observations ou des questions empiriques. (Schmid, 1998 ; Phan, Schmid, Varenne, 2007). Par exemple, en ce qui concerne les modèles économiques, Solow (1997) qualifie de "*model building*" (que l'on traduira simplement par modélisation) la démarche qui consiste à isoler et analyser des relations de dépendances spécifiques dans les phénomènes empiriques : "l'idée est de se focaliser sur un ou deux facteurs au rôle causal ou déterminant, en excluant tout le reste, juste dans l'espoir de comprendre comment ces aspects de la réalité fonctionnent et interagissent" (p.43). Ce type d'approche peut ainsi être vu comme un processus d'abstraction partant des phénomènes empiriques plus que comme un processus de spécification à partir d'un corpus théorique prédéterminé. Ainsi pour Minsky (1965) : « Pour un observateur B, un objet A* est un modèle de l'objet A s'il permet à B d'utiliser A* pour répondre à des questions intéressantes sur A ». Selon ce point de vue, le modèle A* est une abstraction d'un « domaine d'objet » (A) formalisée à l'aide d'un langage non ambigu pour répondre à une question de B. L'idée sous-jacente est alors que l'étude du modèle A*, abstraction de A pourrait être suffisante pour répondre à cette question sur A (Amblard, Bommel et Rouchier, 2006). Le plus souvent cette démarche correspond donc à une visée explicative plus que descriptive, selon la typologie proposée par Bulle (2005).

Ceci ne présuppose pas que nous ayons préalablement une théorie adéquate des phénomènes du domaine considéré, et le modèle ainsi défini n'est pas une « interprétation » d'une théorie existante, mais plutôt un moyen d'expérimenter dans le mode virtuel du modèle le pouvoir explicatif de quelques hypothèses sélectionnées empiriquement. Plus l'explication sera plausible, sur la base d'hypothèses suffisamment parcimonieuses, plus l'exercice de modélisation et le processus de simulation quasi expérimental seront fructueux. « Un bon modèle fait les bonnes simplifications stratégiques. En fait, les modèles réellement bons permettent de comprendre beaucoup de choses à partir d'un très petit nombre de causes » (Sollow, 1997, p. 46). Bien que partant d'un problème concret, un tel modèle abstrait est bien sûr « faux par construction », du point de vue du réalisme des hypothèses. La question clef porte donc

sur la pertinence de ce monde abstrait et fictif du modèle pour l'explication des phénomènes empiriques du « monde réel » qu'il cherche à expliquer. Selon le *point de vue pragmatique*, les modèles sont perçus comme des « médiateurs autonomes » (Morgan et Morisson, 1999) entre théories, pratiques et données expérimentales, construits pour répondre à une problématique spécifique.

Si l'activité de modélisation peut sembler principalement relever d'une approche rationaliste de type hypothético-déductive, elle peut être remise en contexte dans un processus cognitif plus large à partir de *l'enquête peircienne*, parfois qualifiée « d'abductive au sens large » (Walliser, Zwirn, Zwirn, 2003, 2005). Activée par le doute, l'enquête procède selon trois moments : (1) l'abduction (au sens étroit), (2) la déduction et (3) l'induction. « L'abduction consiste à proposer une hypothèse explicative (conjecture provisoire) pour expliquer un fait surprenant qui active le doute. De l'hypothèse, on tire par déduction des conséquences que l'on soumet à l'épreuve, dans une phase inductive, qui n'est pas ici un processus de construction d'hypothèses par généralisation, mais une évaluation empirique. Des résultats négatifs conduisent à reformuler une nouvelle hypothèse (abduction au sens étroit) alors que des résultats positifs diminuent le doute » (Phan, Varenne, 2006, § 4.5.1.2 p.124). Cette démarche diffère de l'induction car il ne s'agit pas de généralisation à partir des observations, mais de former des conjectures pertinentes à partir des observations, comme le fait le médecin avec les symptômes.

Jusqu'au dernier quart du vingtième siècle, où l'on a vu apparaître des contributions significatives comme celles de Hacking (1983), Galison (1987), Franklin (1996), Morisson (1993), *l'expérimentation* a été plutôt considérée comme secondaire par l'épistémologie, qui privilégiait une vue de la science « centrée sur la théorie ». Comme pour les modèles, la contestation de cette vision dominante a commencé par des études de cas qui ont porté sur la nature de l'expérimentation et sur les conditions d'une bonne expérimentation. Par la diversité des cas, ces études n'ont cependant pas contribué à donner encore une vue générique de cette activité. On peut cependant dégager quelques grands principes (Guala, 2006). Le principal concerne le *contrôle* du processus expérimental « expérimenter nécessite d'observer un évènement ou un ensemble d'évènements dans des circonstances contrôlées ». Guala distingue alors deux dimensions particulièrement importantes du contrôle (1) le contrôle sur les variables du système qui sont changées ou manipulées par l'expérimentaliste et (2) le contrôle sur les autres conditions (d'arrière plan) et variables choisies par l'expérimentaliste. Le design du protocole expérimental et les conditions de l'expérience jouent donc un rôle majeur dans la détermination des conditions « artificielles » de l'observation, par opposition à l'observation « naturelle » des phénomènes de la réalité empirique (pour simplifier très grossièrement¹). Enfin, les expériences ont généralement une *fonction opératoire* : elles

¹ En effet, les différences sont loin d'être aussi tranchées dans les deux sens ; par exemple les différences entre théories et observations revendiquées par le positivisme logique ont été mises en cause dès les années soixante, cf. une courte revue dans (Varenne, Phan 2007, § 4.5.1.4). Ou encore l'expérimentateur est un élément « naturel » inévitable dans l'environnement partiellement « artificiel » du laboratoire, ce qui est encore plus marquant dans le cadre des sciences de l'homme et de la société.

sont utilisées pour *répondre à une question* généralement très spécifique, le plus souvent concernant des relations descriptives, ou présumées causales, entre des entités contenues dans l'ensemble artificiellement isolé par l'expérimentation.

2. Le modèle est-il le « laboratoire de l'économiste » ?

Pour Mäki, la modélisation peut être vue comme une activité *quasi-expérimentale* ou le modèle est le « laboratoire de l'économiste » (Mäki, 1992, 2002, 2005). L'activité de modélisation a alors une base quasi-empirique, et dans beaucoup de cas une orientation perspectiviste, et parfois pragmatique (orientée vers l'action). Cette classe de modèles est employée en effet dans un but particulier, à savoir explorer la puissance explicative d'un certain mécanisme causal pris isolément. Selon Livet (2006), ceci ne présuppose pas une théorie du domaine correspondant, le modèle peut en effet être vu comme un ensemble de « contraintes sur les opérations » de nature pré-théorique, ou un assemblage de points de vue théoriques hétéronomes. Le modèle est une manière d'expérimenter dans un « monde virtuel » la puissance explicative de quelques hypothèses empiriquement choisies. Partant d'une situation concrète, mais sélectionnant seulement quelques facteurs, un tel modèle abstrait est évidemment « faux par la construction » (non réaliste quand à ses hypothèses), mais cela ne signifie pas qu'il ne puisse être pertinent, ou plus exactement « convainquant » pour l'explication des phénomènes empiriques du « monde réel ».

Cette sous-section s'organise autour d'une contribution stimulante de Sugden (2002). Ce dernier soutient que des modèles abstraits et quelque peu irréalistes peuvent cependant être utiles et pertinents pour la connaissance du « monde réel ». Cette dernière expression est très largement répandue chez les économistes, en particulier les théoriciens, pour distinguer le « monde abstrait des modèles » du « monde réel » des phénomènes empiriques, bien distinct de ces mondes fictifs. Ceci ne signifie pas que les modélisateurs soient tous de purs formalistes jouant avec des modèles « imaginaires » (suivant la classification d'Achinstein, 1968). Par ailleurs, parler de « monde réel » n'implique pas un engagement réaliste métaphysique (Phan, Varenne 2006). Cela permet juste de souligner la non-naïveté du modélisateur qui reconnaît l'existence d'un *rapport problématique entre le monde abstrait des modèles et le monde concret de la réalité empirique*. En effet, si l'existence de ce rapport problématique est largement acceptée, il y a plusieurs manières de traiter cette question, dont les principales sont exposées dans l'article de Sugden. Nous nous limiterons ici à exposer les points de vue qui sont compatibles avec le sien. Sugden illustre son propos à travers le cas de deux modèles qu'il considère comme typique. Comme nous nous intéressons ici aux modèles de simulation, nous nous limiterons au modèle de ségrégation de Schelling (1971, 1978) que de nombreux auteurs considèrent comme un exemple paradigmatique de modèle agent, produisant d'un phénomène structurel émergent à partir de simples interactions locales (Amblard, Phan, 2006, en particulier les contributions de Nigel Gilbert, ainsi que de Eric Daudé et Patrice Langlois. Sur l'émergence, cf. Dessalles, Müller, Phan 2007).

Un modèle (au sens large, incluant la possibilité de recourir au pluri-formalisme) peut être construit comme un objet abstrait, simplification conceptuelle basée sur une ou des

conjecture(s) suivant le principe de parcimonie, conçu pour répondre à une question empirique (on parlera de conceptualisation à visée empirique). Pour Sugden (2002) une régularité (ou *fait stylisé*²) est d'abord observée dans les phénomènes empiriques, comme par exemple la persistance d'une ségrégation raciale dans l'habitat pour le modèle de Schelling (1978). La *conjecture* de Schelling consiste alors à penser que ce phénomène peut être expliqué par un ensemble limité (parcimonie) de facteurs causaux. Ceci ne signifie pas que ce sont les seuls facteurs explicatifs possibles, ni qu'il s'agit effectivement du facteur causal principal dans le phénomène empirique considéré. Il s'agit juste de montrer à l'aide du modèle qu'il s'agit de candidats explicatifs possibles. Finalement, ce qui est « testé » dans cette démarche, ce sont des « conditions de possibilités » et non la conjecture explicative elle-même. La modélisation empirique peut se situer à différents niveaux d'abstraction, du modèle formel aux relations incomplètement spécifiées (résultats qualitatifs) au modèle implémenté et « calibré » empiriquement (économétrie, enquêtes, expertise...), plus proche des modèles « descriptifs » selon la typologie de Bulle (2005).

La thèse de Schelling peut être schématisée de la manière suivante. Il observe qu'une régularité R (le fait stylisé) peut être trouvée dans les phénomènes empiriques observés dans le « monde réel » ; ici, la ségrégation raciale persistante dans la répartition géographique des logements. Il soutient également que cette régularité peut être expliquée par un nombre limité des facteurs causaux F (principe de parcimonie) ; ici, des préférences locales simples au sujet du voisinage. Pour Sugden, l'approche de Schelling équivaut à faire implicitement trois propositions : (1) R se produit (ou se produit souvent) (2) F opère (ou opère souvent) et (3) F cause R (ou tend à le causer). « Aucune de ces propositions ne se présente comme une conjecture testable, mais chacune comporte, dans le cas considéré des éléments factuels informels qui semblent soutenir les deux premières propositions (..) le modèle formel est très simple, complètement décrit et autonome » (Sugden 2002, p.113-114). La question principale qui reste en suspens concerne donc *le rapport entre ce monde hypothétique, abstrait et autonome et le « monde réel »*. Sugden expose quatre stratégies pour rendre compte de la démarche des économistes : (1) exploration conceptuelle ; (2) instrumentalisme ; (3) modèle comme expériences de pensée ou métaphore explicatives, incomplètement déductives, pour lesquelles (4) une inférence inductive complémentaire entre le mode du modèle et le « monde réel » est requise (argument du « monde crédible »). Comme Sugden, nous n'adhérons pas à la stratégie instrumentaliste (généralement rattachée à Friedman 1953), et nous ne traiterons donc que des trois stratégies restantes.

Pour Daniel Hausman (1992), en plus de la « théorisation empirique » (démarche à portée – ou visée – théorique mise en œuvre pour répondre à un problème de nature empirique) qui motive initialement l'activité de modélisation, les modèles théoriques (c'est-à-dire élaborées selon une méthode et une visée théorique, sans nécessairement

² Les économistes emploient en particulier la notion de fait stylisé, introduite par Kaldor (1961) dans le contexte de la théorie de croissance économique (pour une présentation rapide cf. Dubois, Phan 2007).

qu'il existe préalablement un ancrage théorique fort) des économistes peuvent aussi être employés pour « *l'exploration conceptuelle* » (interne au monde du modèle). Dans celle-ci, les *propriétés* d'un modèle peuvent être étudiées indépendamment de la question empirique qui a donné lieu à la conceptualisation, comme de la question du rapport entre le monde du modèle et le « monde réel ». En d'autres termes, *l'objet de l'exploration est bien l'étude des propriétés du modèle en lui-même et non celle de l'objet empirique* à l'origine de la modélisation. En ce sens, les méthodes utilisées pour l'exploration et l'évaluation « interne » des propriétés du modèle dépendent de son type (analytique, informatique mono ou pluri-formalisme etc...) et non de son rapport aux phénomènes empiriques (par exemple : Varenne 2007, conclusion).

L'exploration conceptuelle comprend en particulier l'évaluation de la *robustesse* des résultats du modèle à des variations des hypothèses (par exemple par des études de sensibilités). Lorsque le moyen d'exploration n'est pas purement analytique, certains auteurs soutiennent donc qu'il s'agit d'une activité expérimentale, dont les « faits » sont produits par le modèle. Comme le remarque Hausman (1992), cette exploration conceptuelle est une activité utile en soi car « il y a de nombreux exemples d'inconsistances insoupçonnées ou de propriétés non identifiées » dans les modèles existants.

L'exploration conceptuelle possède également une valeur empirique par elle-même, puisqu'il est possible d'exhiber des conditions de possibilités ou des propositions contrefactuelles pour une proposition empirique donnée, comme Sugden le souligne : « Schelling présente la critique d'opinions généralement admises selon lesquelles la ségrégation pourrait être le produit soit d'une politique publique délibérée soit de préférences fortement ségrégationnistes ».

Le modèle de Schelling est un contre-exemple de ces propositions : « il montre que la ségrégation pourrait survenir sans que l'un ou l'autre de ces facteurs soit présent (..) Schelling n'affirme pas que 'R se produit, F opère, et F cause R'. Tout qu'il affirme est que : 'R *pourrait* se produire, F *pourrait* opérer, et F *pourrait* causer R' » (Sugden 2002, p.115 souligné par nous). De telles conditions des possibilités peuvent ainsi permettre d'identifier de possibles difficultés avec les théories existantes. Ainsi, les conditions des possibilités peuvent être utiles pour le but empirique, même si les effets mis en évidence ne sont pas une explication effective, mais une explication possible et parfois crédible.

De ce point de vue, l'exploration conceptuelle, comme l'exemple du modèle de Schelling, ne doit pas être regardée comme une tentative de proposer une théorie complète du phénomène, mais comme exercice partiel et utile, qui fournit une *hypothèse explicative possible* pour rendre compte du phénomène considéré, mais *jamais une explication ultime* : « le théoricien déclare la confiance qu'il a dans cette approche qui est susceptible de *fournir une explication* même si il ne soutient pas qu'il a ainsi tout expliqué » (Sugden 2002, p.116, souligné par lui). Ainsi, l'exploration conceptuelle nous permet de *vérifier la consistance interne du modèle* et en même temps *d'augmenter notre connaissance et confiance dans ce modèle*. Mais si l'exploration conceptuelle n'est pas par elle-même une activité empiriquement orientée, elle peut être à la fois

empiriquement fondée et pertinente pour la recherche empirique, comme nous l'avons déjà souligné. Cette *pertinence empirique* a besoin d'une position épistémique additionnelle au sujet du rapport entre le monde du modèle et le « monde réel ».

(3) Les modèles économiques peuvent être vus comme des *expériences de pensée* (Sorensen 1992) portant sur des entités et des relations isolées par abstraction. Selon Hausman (1992), la modélisation économique « formule de crédibles et pragmatiquement commodes généralisations (*ceteris paribus*) » grâce à ce qu'il appelle « une méthode déductive inexacte ». Alors que Hausman parle de propositions inexactes, Mäki (1992) préfère parler « d'isolation » : les modèles théoriques décrivent un aspect délibérément isolé de la réalité empirique : « un ensemble d'éléments est théoriquement soustrait à l'influence d'autres éléments dans une situation donnée » (p. 318). Dans son article sur la méthode d'isolation en sciences économiques, Mäki (1992) souligne la *similitude entre l'isolement théorique et l'isolement expérimental* ; dans les deux cas, un nombre limité d'éléments et des relations sont étudiées, en les isolant et en excluant quelques autres. L'isolation est un avantage du contrôle expérimental, dans un environnement « pur » quelque peu irréaliste, qui nous permet d'étudier un aspect de la réalité empirique.

Pour Mäki, les modèles sont des expériences de pensée. Mais dans son article : « les modèles sont des expériences et les expériences sont des modèles » (Mäki, 2005) on peut penser qu'il pousse la similitude des démarches un peu loin. On peut, au contraire, parler de *formes d'expérience*, car l'exploration par modélisation peut difficilement être considérée comme complètement similaire à une démarche expérimentale complète au sens usuel du terme. Pour Morgan (2005) modèles et expériences partagent des fonctions de médiateurs et peuvent fonctionner « sur un mode expérimental », mais les expériences « réelles » offrent un « pouvoir épistémique » d'investigation de la réalité empirique plus fort. Par contre, ontologiquement, l'expérience porte sur *des éléments artificiellement isolés du « monde réel »* alors que *le monde des modèles est intrinsèquement un monde artificiel* construit pour explorer le « monde réel » en dehors (et indépendamment) de lui.

Cette différence ontologique n'est pas sans conséquences épistémiques. Morgan souligne ainsi que si l'on peut être « surpris » par l'exploration d'un modèle, on est rarement « perplexe » (*confounded*) comme un expérimentateur peut l'être devant une expérience. Dans le cas d'un modèle analytique³, le modélisateur a en principe une connaissance assez large des hypothèses et des propriétés d'un objet qu'il a lui-même construit. Dans le cas d'une expérience, l'expérimentateur se trouve souvent devant un phénomène « opaque », parce qu'il reste des éléments inconnus ou incontrôlés inexplicables dans le cadre des théories existantes. Par contre d'autres similitudes, en particulier dans la question du rapport entre le monde « isolé » du modèle ou de

³ Ceci est beaucoup moins vrai pour un modèles « multi-agent » lorsqu'il n'existe pas de solution analytique et a fortiori pour un « système de modèles », comme on le verra dans la section 3. Dans ce cas, les conditions pratiques se rapprochent beaucoup plus de l'expérimentation.

l'expérience et le « monde réel » dans le cadre de l'argumentation scientifique doivent être soulignées.

Pour Sugden, la méthodologie de l'exploration conceptuelle d'un modèle est semblable aux deux premières étapes de la méthode « déductive inexacte » de Hausman (1992) : (i) le modélisateur doit formuler (*ceteris paribus*) une généralisation crédible pragmatiquement commode concernant les opérations relatives à la variable causale appropriée (c.-à-d. les facteurs qui ont été isolés selon la méthode de Mäki) ; (ii) le modélisateur emploie le raisonnement déductif pour identifier quels effets ces facteurs auront sous ces hypothèses spécifiques (c.-à-d. dans cet environnement d'isolation particulier). Les études de robustesse fournissent des raisons de croire que le modèle n'est pas spécifique mais pourrait être généralisé, incluant le modèle initial comme cas particulier. Le processus cognitif correspondant est une *inférence inductive* depuis l'ensemble des modèles déjà expérimentés vers celui des modèles plus généraux. Mais ce mode du raisonnement demeure dans le monde des modèles et pas entre le monde du modèle et le « monde réel », Comme Sugden le souligne, *il est nécessaire d'établir des liens entre les deux mondes.*

(4) L'argument du *monde crédible* fonctionne comme inférence inductive du monde des modèles vers le « monde réel » : le résultat est l'identification de *similitudes* significatives entre ces deux mondes (Livet, 2006). Selon Hume, l'induction est enracinée dans l'association des idées que les êtres humains identifient comme similaires. Ce processus cognitif d'inférence, certainement utile du point de vue psychologique et évolutionnaire est cependant incorrect d'un point de vue logique, comme Hume le reconnaissait lui-même. Quoi qu'il en soit, si le résultat de l'inférence est un argument pour la crédibilité du modèle, il reste dans le domaine des croyances, et ne peut être considéré comme une preuve objective de vérité : il « peut être expliqué en termes psychologiques, mais non considéré comme une justification rationnelle » (Sugden, 1992, p. 135). Pour Sugden, Schelling a construit des cités imaginaires, dont les mécanismes générateurs peuvent être facilement compris ; celles-ci peuvent être vues comme des cités possibles, au côté des citées réelles. Nous sommes invités à faire l'inférence inductive que des processus causaux similaires se produisent dans les cités réelles. « Puisque les mêmes effets peuvent être observés à la fois dans des cités réelles et imaginaires, il est au moins crédible de supposer que les mêmes causes ont les mêmes effets » (Sugden, 2002, p.130).

Le « raisonnement inductif » de Sugden peut être vu comme un moment du processus abductif peircien au sens large tel qu'il a été résumé brièvement précédemment. (a) Le modélisateur observe que la ségrégation se produit dans le monde réel, et fait la conjecture (l'abduction au sens étroit) que la ségrégation (S) est provoquée par les préférences individuelle relatives à la structure de voisinage (PIrSV). (b) Le modélisateur expérimente et déduit que dans le monde du modèle, S est provoqué par la composition des choix résultant des PIrSV. (c) Le modélisateur en infère qu'il y a de bonnes raisons de croire que les PIrSV produisent également ce type d'effet dans le « monde réel », même si ce n'est pas la seule cause possible de S.

Ainsi, les choix résultant des PIRSV sont des candidats crédibles pour expliquer S (les philosophes disent que c'est une *condition de possibilité*) et le monde du modèle est « une réalité possible ». De ce point de vue, « le modèle n'est pas tant une abstraction de la réalité qu'une réalité parallèle (...) bien que le monde du modèle soit plus simple que le monde réel, celui-ci n'est pas une simplification de l'autre. Le modèle est réaliste dans le même sens qu'un roman peut être appelé réaliste (...) les personnages et les lieux sont imaginaires, mais l'auteur doit nous convaincre qu'ils sont crédibles » (Sugden, 2002, p.131). Ainsi, Schelling essaye de nous convaincre que le monde de son modèle est une réalité possible : comme Sugden le dit, Schelling a construit un modèle de cité habitée par des agents qui sont d'une certaine manière « comme de vraies personnes ».

Dans l'approche de Sugden, il y a une différence entre le monde du modèle et le « monde réel ». Mais les économistes utilisent parfois « des dispositifs rhétoriques qui tendent à masquer ces différences ». Au lieu de cela, il vaudrait mieux dire explicitement que faire face au problème de cette différence ne résout pas le problème logique, mais contribue à rendre convainquant l'argumentation selon lequel ces modèles peuvent être de bons candidats pour être des mondes contrefactuels crédibles.

3. La simulation multi-agents : une expérimentation concrète ?

Les simulations multi-agents (Ferber 1995, Amblard, Phan, 2006) ne peuvent être ramenées, pour une large part, à de simples techniques de calcul numérique. Elles reposent sur de complexes chaînes d'interactions qui nécessitent une réflexion méthodologique spécifique (Winsberg 1999). Il convient donc de distinguer la *simulation comme complément des méthodes analytiques* traditionnelles, en particulier comme calcul numérique : « l'utilisation d'un ordinateur pour résoudre des équations qui ne peuvent être résolues analytiquement » (Humphreys 1991) et la *simulation d'un système complexe*, non nécessairement dérivable d'un modèle analytique (par exemple, vie artificielle : Heudin, 1994). Ainsi pour Hartmann (1996), il s'agit alors d'un « processus qui mime les caractéristiques pertinentes d'un processus cible ».

Quel est le statut épistémologique de la simulation ? Pour Varenne (2003) on peut distinguer trois grandes thèses. (1) La simulation est une forme d'expérience (cf. par exemple Bedau, 1999). (2) Les simulations n'ont pas de contenu empirique et ne sont que de simples outils intellectuels (par exemple : Oreskes *et al.* 1994). (3) La simulation est une nouvelle méthode scientifique qui suppose une épistémologie spécifique (Winsberg, 2003, 2008 ; Axelrod, 2005, Varenne 2003, 2007, Phan, Varenne 2006).

Dans notre domaine, Axelrod (2005) considère que la simulation est « une troisième voie pour faire de la science » entre *modélisation* et *expérimentation*. « Comme méthodologie scientifique, la valeur de la simulation dépend principalement de ses capacités de prédiction, de preuve et de découverte. Comme la déduction, elle commence par un ensemble d'hypothèses explicites. Mais à la différence de la déduction, elle ne prouve aucun théorème. La simulation produit plutôt des données qui peuvent être analysées empiriquement (expérience « quasi-empirique »). Mais cependant, à la différence de l'induction classique, les données simulées proviennent d'un ensemble de règles spécifiées rigoureusement et non de mesures directes sur le

‘monde réel’ ». Pour Axelrod, la simulation est donc « un autre moyen de faire des expériences », ce qui l’amène à valoriser plus particulièrement la dimension « découverte » comme principal fondement de valeur scientifique de cette pratique.

Varenne considère une classe de simulation qu’il qualifie « d’informatique » (distincte de la simulation numérique au sens du calcul numérique de Humphreys, 1991) Ce qu’il définit comme « simulation informatique » repose sur des *systèmes de modèles pluri-formalisés en interaction*, qu’il décrit comme une « écologie de formalismes objectivés » (Varenne 2003, p. 310). Pour lui, les mathématiques utilisées dans ces modèles ne sont plus « constitutives » mais « descriptives » (Varenne, 2003, p. 206). En effet l’hétérogénéité formelle du système de modèles considéré est – au moins temporairement - irréductible à une axiomatique ou à un système formel unique qui permettrait d’avoir une théorie homogène de ce système : « elle est une utilisation physique des mathématiques » (Varenne, 2003, p. 207). « La simulation nous met ainsi en face de l’*expérience* d’une coexistence dynamique entre *des formalismes traités comme des objets* et *communiquant* comme tels » (Varenne 2003, p. 310, souligné par nous). La connaissance que l’on peut dériver d’un tel système de modèles n’est – du moins temporairement – accessible qu’a posteriori, de manière descriptive, à partir des résultats de la simulation, il s’agit donc d’une *connaissance empirique d’une nature particulière*, car elle porte sur le système de modèle et non sur le domaine d’objet du « monde réel » qu’il mime – ou simule. C’est pourquoi Varenne qualifie les expériences réalisées à l’aide de simulation « *d’expériences concrètes du second genre* » (le premier genre étant l’expérimentation traditionnelle).

Si l’on adhère à la thèse de Varenne, dans quelle mesure les expériences par simulation, qui portent sur un mode virtuel - « in silico » - produisent-elles des arguments crédibles pertinents pour le « monde réel » ? Finalement, la validité et la crédibilité d’une expérimentation contrôlée par simulation « informatique » pose, à un niveau générique, le même type de problème qu’une expérience virtuelle par exploration d’un modèle par des moyens analytiques. En fait, cette simulation « informatique » est une *autre forme d’exploration d’un monde hypothétique, plus expérimentale que conceptuelle* ou analytique. C’est pourquoi le même type de problème se pose dans son rapport au « monde réel ». Néanmoins, *comme la méthodologie d’exploration diffère, les critères de crédibilité sont différents*. La crédibilité d’une expérience par simulation repose donc largement sur la crédibilité du protocole d’expérimentation suivi. Dans son ouvrage sur l’épistémologie de l’expérimentation, Franklin (1986) pose la question de savoir comment on peut « croire rationnellement » dans un résultat expérimental ? Selon cet auteur, il n’existe pas de critère définitif dans ce domaine. Cependant, il note qu’une des préoccupations des expérimentalistes est d’identifier *les sources possibles d’artefact*, qui produiraient des résultats attribuables principalement à la méthode suivie. Winsberg (1999) considère que les mêmes questions se posent pour la simulation et il propose une liste des points critiques d’un protocole de simulation. Comme Winsberg s’intéresse principalement à des modèles de simulation dérivés de la théorie physique, ses deux premiers points concernent moins la classe des systèmes de modèles considérée par Varenne, mais garde un certain degré de pertinence dans ce cas. Il s’agit en effet de la structure « calculatoire » de la théorie considérée et des « techniques mathématiques de

transformation » (par exemple la discrétisation d'un modèle continu). Dans la mesure où les pluri-formalismes peuvent être partiellement dérivés de modèles ou de théories existantes, et surtout peuvent faire coexister des formalismes de nature différente (Ramat, 2006) ces deux questions ne sont pas complètement étrangères à la simulation « informatique ». Les autres points énumérés par Winsberg concernent toutes les formes de simulation. Il s'agit d'abord du choix des paramètres, des conditions initiales et aux bornes, des réductions dans les degrés de liberté du système. Il cite également l'utilisation de modèles « *ad hoc* », l'implémentation sur un ordinateur particulier et plus généralement par un algorithme (ou une modélisation informatique) particulier. Finalement, il s'agit de tout ce qui concerne l'analyse et l'interprétation des résultats du processus de simulation (interface graphique, séries de données et évaluation de leur pertinence, traitements statistiques etc...).

La maîtrise de l'ensemble de ces points dépasse largement la maîtrise du seul formalisme initial (de l'ontologie du modèle ou du système de modèles). Des méthodes d'évaluation des expériences de simulations se construisent progressivement et restent encore largement sujettes à débat (Amblard, Bommel, Rouchier 2006). Il est clair qu'un important travail d'évaluation des méthodes de modélisation informatiques (design d'ontologie et d'architectures, techniques d'implémentation...) et des protocoles de simulation reste à faire. Les workshops « model to model » (Hales, Edmonds, Rouchier, 2003) vont dans ce sens.

Conclusion

Aujourd'hui, comme le souligne Winsberg, la crédibilité des modèles de simulation repose largement sur la *confiance* que nous pouvons avoir dans les compétences des modélisateurs, informaticiens, expérimentateurs et observateurs, ainsi que dans les composants ou plateformes qui supportent les expériences de simulation. L'épistémologie de l'exploration par simulation, vue comme une « expérience concrète du second ordre », est donc beaucoup plus une *épistémologie empirique de l'expérimentation* qu'une épistémologie mathématico-logique comme celle qui concerne pour une grande part l'exploration conceptuelle des modèles. Mais ces deux approches ont en commun de porter sur *des mondes hypothétiques* et peuvent être vues (à des degrés divers : faible pour les modèles analytiques, forte pour la simulation) comme des *formes d'expérimentation dans un monde virtuel*. Dans les deux cas, ces mondes virtuels (ou hypothétiques) sont candidats au titre de « mondes crédibles » dans l'argumentation scientifique relative au « monde réel ».

Références

- Achinstein P. *Concepts of Science a philosophical analysis*, Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1968
- Amblard F., Bommel P., Rouchier J. « Evaluation et validation de modèles multi-agents » in (Amblard, Phan, Eds. 2006) p. 87-103
- Amblard F. Phan D. (eds.) *Modélisation et simulation multi-agents, applications pour les Sciences de l'Homme et de la Société*, Londres, Hermes-Sciences & Lavoisier, 2006.

- Axelrod R., "Advancing the Art of Simulation in the Social Sciences" in Rosario Conte, Rainer Hegselmann and Pietro Terna Eds., *Simulating Social Phenomena* Berlin: Springer-Verlag, 1997, p. 21-40, updated version in Rennard J.P. Ed., *Handbook of Research on Nature Inspired Computing for Economy and Management*, Hersey, PA: Idea Group, 2006.
- Axtell, R. L. "Why agents? On the varied motivations for agent computing in the social sciences", in Macal M. Sallach D. eds., *Proceedings of the workshop on agent simulation: Applications, models, and tools* (pp. 3–24). Chicago, IL: Argonne National Laboratory, 2000 p..
- Bedau M. "Can unrealistic computer models illuminate theoretical biology?", in Wu, Ed., *Proceedings of the 1999 Genetic and Evolutionary Computation Conference Workshop Program*, 1999, Orlando: GECCO, p. 20-23.
- Bulle N. « Les modèles formels et l'explication en sciences sociales », *L'Année sociologique* , 55(I), 2005, p. 19-34
- Dessalles J.L., Müller J.P., Phan D. "Emergence in multi-agent systems: conceptual and methodological issues" in Phan, Amblard, Eds *Agent Based Modelling and Simulations in the Human and Social Sciences*, Oxford, The Bardwell Press, 2007, p 327-356.
- Dubois M., Phan D. "Philosophy of Social Science in a nutshell: from discourse to model and experiment", in Phan, Amblard, Eds *Agent Based Modelling and Simulations in the Human and Social Sciences*, Oxford, The Bardwell Press, 2007, p 393-431.
- Ferber J. *Les Systèmes Multi-Agents*, Paris InterEditions, 1995
- Ferber J. "Concepts et méthodologie Multi-Agents", in (Amblard, Phan, Eds. 2006), p. 23-48.
- Franklin A., *The Neglect of Experiment*, Cambridge, Cambridge University Press, 1986
- Friedman M. *Essays on Positive Economics*, University of Chicago Press, 1953.
- Galison, P. *How Experiments End*, Chicago, University of Chicago Press, 1987. Traduction française *Ainsi s'achèvent les expériences. La place des expériences dans la physique du XXe siècle*, Paris, La Découverte, 2002.
- Guala F. "Models, Simulations, and Experiments", in L. Magnani and N. J. Nersessian (eds.) *Model-Based Reasoning: Science, Technology, Values*. New York: Kluwer, p. 59-74.
- Guala F. "Experimentation in Economics" Mäki.U. ed. *Handbook of the Philosophy of Science, Volume 13: Philosophy of Economics* forthcoming 2008
- Gérard-Varet L.-A., Passeron J.-C. *Le modèle et l'enquête, les usages du principe de rationalité dans les sciences sociales*, Paris, Editions de l'EHESS, 1995
- Gilbert N., Conte R. (eds.) *Artificial Societies : The Computer Simulation of Social Life*, London UCL Press, 1995
- Hacking I. *Representing and Intervening*, Cambridge University Press, 1983, traduction *Concevoir et expérimenter*, Paris, Christian Bourgois ed., 1989.
- Hales D., Edmonds B., Rouchier J. "Model to model analysis", *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, vol.6, n°4, 2003
- Hartmann S. "The world as a process", in Heselmann, Müller and Troitzsch Eds, *Modelling and simulation in the social sciences from the philosophy of science point of view*, Kluwer, 1996 p. 77-100.
- Hausman D.M. *The Inexact and Separate Science of Economics*, Cambridge Ma., Cambridge University Press, 1992.
- Heudin J.C. *La Vie Artificielle*, Paris, Hermès Science, 1994
- Humphreys P. "Computer Simulations"; *PSA Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, Vol. 1990 (2): Symposia and Invited Papers 1990, p. 497-506.
- Humphreys "Computational Models", *Philosophy of Science*, 69, 2002, S1-S11.
- Humphreys "Computational Science and Scientific Method", *Minds and Machines*, 1995,.
- Kagel J., Roth A.E. (eds) *Handbook of Experimental Economics*, Princeton, NJ, 1995.

- Legay J.-M. *L'expérience et le Modèle. Un discours sur la méthode*, Paris, INRA, 1997.
- Livet P. « Statut épistémologique de la simulation en sciences de l'homme et de la société », in Amblard F., Phan D. (2006) chap. 8, p. 193-218.
- Mäki U. "On the method of isolation in economics", in special issue of *Poznan Studies in the Philosophy of the Sciences and the Humanities*, "Idealization IV: Intelligibility in Science", edited by Dilworth C. Vol. 26, 1992, p. 319-354; reprinted in Davis J. ed. *Recent Developments in Economic Methodology*, Elgar.
- Mäki U. "The dismal queen of the social sciences", in Mäki U. ed.. *Fact and Fiction in Economics. Realism, Models, and Social Construction*, Cambridge University Press, 2002, p.3-34.
- Mäki U. "Models are experiments, experiments are models", *Journal of Economic Methodology*, 12(2), 2005, p.303-315.
- Minsky M. "Matter, Mind and Models", *Proceedings of IFIP Congress*, 1965, p. 45-49.
- Morgan, M. S. "Model Experiments and Models in Experiments," in L. Magnani and N. J. Nersessian (eds.) *Model-Based Reasoning: Science, Technology, Values*. New York: Kluwer, 2002, p. 41-58.
- Morgan M.S. "Experiments without material intervention: model experiments, virtual experiments and virtually experiments", in Radder, H. *The philosophy of scientific experimentation*. University of Pittsburgh Press, 2003, p. 217-235
- Morgan, M. S. "Experiments versus Models: New Phenomena, Inference and Surprise". *Journal of Economic Methodology* 12, 2005, p. 317-29.
- Morgan M.S., Morrison M. *Models as Mediators*, Cambridge University Press, 1999.
- Morrison, M. C. "Experiment," in Craig Ed. *The Routledge Encyclopaedia of Philosophy*, London: Routledge, 1998, p. 514-8.
- Nagel E. *The Structure of Science*, New York, Harcourt Brace and World, 1961
- Nouvel P. (ed.) *Enquête sur le concept de Modèle*, Collection sciences, histoire et sociétés, Paris, Presses Universitaires de France, 2002
- Peck S.L. "Simulation as experiment: a philosophical reassessment for biological modelling", *Trends in Ecology & Evolution* 19 (10ç, October 2004, p.530-534
- Phan D., Varenne F « Concevoir et expérimenter : épistémologie dans une coquille de noix », in Amblard F. Phan D. Eds. *Modélisation et simulation multi-agents, applications pour les Sciences de l'Homme et de la Société*, Londres, Hermes-Sciences & Lavoisier, 2006, p. 121-140.
- Phan D., Schmid A-F., Varenne F. "Epistemology in a nutshell: Theory, model, simulation and Experiment" in Amblard, Phan. eds *Agent Based Modelling and Simulations in the Human and Social Sciences*, Oxford, The Bardwell Press, 2007, p. 357-392
- Ramat E. « Introduction à la modélisation et à la simulation à évènements discrets », in (Amblard, Phan, Eds. 2006) p. 87-103
- Schelling T.S. "Models of Segregation", *American Economic Review*, 59-2, p.488-493, 1969.
- Schelling T.S. *Micromotives and Macrobehaviour* N.Y Norton and Co, 1978, traduction française: *La tyrannie des petites décisions*; Paris, Presses Universitaires de France, 1980.
- Schmid A.-F. *L'âge de l'épistémologie*, Paris, Kimé, 1998
- Sorensen R.A. *Thought Experiments*, Oxford University Press, 1992
- Sugden R., "Credible Worlds: The Status of Theoretical Models in Economics", in Mäki U. Ed.. *Fact and Fiction in Economics. Realism, Models, and Social Construction*, Cambridge University Press, 2002, p.107-136.
- Solow R.M. "How did economics get that way and what way did it get?", *Daedalus*, Winter, 126:1, 1997, p. 39-58
- Tesfatsion L., Judd K.L. *Handbook of Computational Economics*, Vol. 2: Agent-Based Computational Economics, Amsterdam, New York, Elsevier North-Holland, 2006.

- Ulises Moulines C. *La philosophie des sciences : l'invention d'une discipline (fin XIX^e- début XXI^e siècle)*, Paris, Editions Rue d'Ulm / presse de l'ENS, 2006
- Varenne F. « La simulation conçue comme expérience concrète », *Actes des 10èmes journées de rencontres interdisciplinaires sur les systèmes complexes naturels et artificiels* (Rochebrune, 2003), éditions de l'Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications de Paris, 2003 p. 299-313.
- Varenne F. *Du modèle à la simulation informatique*, Paris, Vrin, 2007.
- Walliser B., Les fonctions des modèles économiques, in A. Leroux, P. Livet eds., *Leçons de philosophie économique*, tome 3, Paris, Economica, 2006
- Walliser B., Zwirn D., Zwirn H. « Raisonnements non certains et changement de croyances », in MARTIN T. *Probabilités subjectives et rationalité de l'action*, Paris, CNRS, 2003
- Walliser B., Zwirn D., Zwirn H. Abductive logics in a belief revision framework, *Journal of Logic, Language and Information*, 14(1), 2005, p. 87-117.
- Winsberg E. "Sanctioning models: the epistemology of simulation", *Science in Context*, 12, 1999, p. 275-292.
- Winsberg E. "Simulated Experiments : Methodology for a Virtual World", *Philosophy of Science*, 70, , January, 2003, p. 105-125.
- Winsberg E. "A Tale of Two Methods" *Synthese*, forthcoming, 2008.