

Epistémologie des modèles et des simulations

Franck Varenne

► **To cite this version:**

Franck Varenne. Epistémologie des modèles et des simulations : Tour d'horizon et tendances. Epistémologie des modèles et des simulations : tour d'horizon et tendances, Dec 2008, Paris, France. <hal-00674144>

HAL Id: hal-00674144

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00674144>

Submitted on 28 Feb 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Epistémologie des modèles et des simulations : tour d'horizon et tendances

Franck Varenne

Université de Rouen et GEMASS/CNRS UMR 8598 – franck.varenne@univ-rouen.fr

Introduction : omniprésence, diversité, perplexité

Les modèles et les simulations sont aujourd'hui omniprésents. Que l'on se renseigne sur le changement climatique, sur les méthodes de prévisions météorologiques, sur les méthodes de l'archéologie expérimentale, sur les procédés de conception d'un avion, d'une voiture ou d'un immeuble, ou encore sur les méthodes de l'ingénierie de la connaissance - pour ne donner qu'une liste limitée de domaines très différents - on tombera toujours à un moment ou à un autre sur des pratiques de modélisation et de simulation.

Il est rare aujourd'hui de visiter un laboratoire ou un bureau d'études sans voir des chercheurs et des ingénieurs s'affairant autour de modèles ou de simulations. À tel point que l'on peut se demander, dans certains cas, ce qu'est devenu le réel. Notamment, on peut se demander ce qu'est devenue la pratique expérimentale réelle et si elle a trouvé des substituts adéquats dans les modèles et les simulations. On se doute que la réponse sera fortement nuancée. Ainsi, on peut se poser la question : n'a-t-on pas excessivement congédié le réel pour lui préférer ce qui passe le plus souvent pour sa représentation ou sa copie, à savoir le modèle ou la simulation ?

Cette interrogation est devenue tout à fait urgente dans la mesure où le recours à l'ordinateur a partout démultiplié les dimensions et les pouvoirs de la modélisation. Cette interrogation s'est même récemment invitée dans nos médias lorsque la crise financière de 2008 a battu son plein. Les modèles mathématiques de la finance étaient en première ligne dans le feu des critiques. J'évoquerai d'ailleurs ponctuellement certaines des caractéristiques de ce type de modèles : peut-être les critiques qu'on a pu lire sont-elles en grande partie justifiées, cela d'un strict point de vue épistémologique.

Mais, après cette crise des modèles - modèles d'un type particulier, précisons-le d'emblée, et œuvrant dans un champ disciplinaire particulier -, la question au sujet de la perte du réel - celle qui nous préoccupe donc ici - ne peut pas rester focalisée sur la critique de ces

seuls modèles. En revanche, elle peut devenir opportunément celle de savoir si tous les modèles scientifiques sont du même type que les modèles mathématiques de la finance. Dans l'affirmative, il est fort probable qu'il y aurait de sérieuses raisons de s'inquiéter.

Cependant, les choses sont plus complexes encore. Le monde actuel des modèles et des simulations dans les sciences et techniques présente une si grande diversité qu'il devient extrêmement difficile de les concevoir dans un cadre épistémologique unique. C'est bien la variété des pratiques comme la variété des méthodologies et des épistémologies qui semblent la règle. C'est donc sans doute un défi quasi-impossible à relever que de chercher à élaborer une seule et unique « épistémologie des modèles et des simulations ».

En guise de caractérisation liminaire, toutefois, on peut dire grossièrement que les modèles sont des constructions matérielles ou formelles servant à représenter quelque chose, quelque chose de réel ou de fictif. On comprend alors qu'une fois mis en rapport avec des dispositifs de conception, de construction ou d'intervention, les modèles servent à transformer le réel ou à l'anticiper, voire, peut-être, dans certains cas, à le supplanter. Malgré cela, on verra qu'un modèle n'est pas même toujours une représentation : en fait, son rapport au réel est pour le moins multiple.

Quant aux simulations, on peut, en première approche, tantôt les voir comme un type particulier de modèle (un modèle phénoménologique, c'est-à-dire un modèle qui rend compte seulement des performances visibles d'un système) tantôt comme un traitement particulier de modèle (un calcul de modèle). Par là, on peut concevoir les simulations comme des modèles de modèle ou des modèles à la seconde puissance. Avec comme conséquence cette question qui vient redoubler notre interrogation : si les simulations peuvent être vues comme des modèles de modèles, les simulations ne nous éloigneraient-elles pas du réel d'un degré supplémentaire ? La simulation ne serait-elle pas le comble de la modélisation, en l'espèce le comble de la mauvaise modélisation, c'est-à-dire cette dimension de la modélisation par quoi le modèle tombe définitivement dans la surenchère et perd tout ancrage dans le réel ? Pourtant, les choses là aussi sont complexes : la simulation se révèle très souvent un moyen puissant et novateur de reconnecter les modèles avec le réel. Comment donc s'expliquer toute cette diversité ?

Je vais procéder de manière progressive. Dans un premier temps, je vais proposer un bref historique puis un état des lieux concernant les différentes catégories de modèles et d'épistémologies des modèles. Dans un second temps, nous reviendrons sur le cas des simulations et sur une typologie qui pourrait passablement leur convenir, jusqu'à plus ample informé. J'évoquerai en passant quelques tendances récentes.

I- Les modèles : un bref historique

1- Un peu de terminologie

Le terme « modèle » vient du latin *modulus* (petite mesure), *via* le mot italien *modello* qui désignait l'unité de mesure étalon (le module) servant à définir les rapports entre les dimensions des édifices architecturaux. De façon très générale, le terme de « modèle » semble destiné à désigner ce à quoi on se rapporte pour représenter quelque chose¹.

Du fait de cette origine, le terme modèle reste ambigu : quel est exactement « ce à quoi on se rapporte pour représenter » ? Assez logiquement, le terme de modèle désigne à la fois ce qu'on imite et ce qui imite. C'est tantôt l'objet modélisé, tantôt l'objet modélisant.

Mais c'est bien aujourd'hui la seconde signification qui prévaut dans les techniques et les sciences. Le modèle dont nous parlerons ici, c'est l'objet modélisant. Le biologiste et modélisateur Jean-Marie Legay rappelle toutefois qu'il faut périodiquement alerter les scientifiques sur cette ambiguïté de manière à les prévenir contre tout risque de tomber amoureux de leur modèle - tel Pygmalion.

Je vais proposer maintenant quelques jalons d'histoire des modèles.

2- Quelques jalons historiques

Pendant très longtemps, et même encore aujourd'hui, le terme de modèle a été synonyme de représentation réduite ou simplifiée. Simplifiée : cela signifie d'abord qu'il peut être réalisé à une échelle différente de ce qu'il représente. Dans ce cas, les matériaux utilisés pour le modèle sont de qualité physiquement semblable à ceux dont est constitué ce qu'il représente. Un tel modèle est une reproduction physique. Il est apparenté à une maquette : d'où l'expression « modèle réduit ». C'est ce qu'on appelle aujourd'hui un modèle physique.

Chez les ingénieurs du 16^{ème} siècle, le modèle physique a la double fonction de persuader et de permettre des simulations, c'est-à-dire la « monstration des effets », selon l'expression de l'époque reprise par l'historienne des sciences Hélène Vérin². Le modèle de

¹ Voir aussi les points d'histoire du terme dans (Canguilhem 1968), (Bachelard 1979), (Legay 1997) et (Varenne 2004).

² (Vérin 1993), p. 45.

l'ingénieur est là pour illustrer un argument ou pour remplacer un calcul par une mesure directe sur le modèle, comme encore dans nos actuelles souffleries. Le modèle physique du corps humain – par exemple le fameux écorché de cire -, quant à lui, est là pour permettre la fixation des idées et l'enseignement de l'anatomie.

Dans les langues européennes, le terme modèle a ainsi longtemps désigné ce type de modèle physique. Ce n'est qu'à partir des développements de la physique de la fin du 19^{ème} siècle³ (mais aussi à partir de certains développements mathématiques⁴) que ce terme a été de plus en plus employé pour désigner autre chose qu'un construit physique réel à visée de reproduction simplifiée.

Le physicien Maxwell⁵ crée un oxymore, une contradiction dans les termes, lorsqu'il qualifie de « modèle géométrique »⁶ l'imagerie des lignes de force inventée par Faraday. Cette façon de procéder possède la qualité, selon lui, de nous faire « obtenir des idées physiques sans théorie physique »⁷. Ici, même si le modèle est explicitement qualifié de « géométrique », il permet non pas tant de mathématiser directement un domaine physique nouveau que de se le représenter physiquement en l'absence (supposée temporaire) de théorie physique adéquate. Maxwell range ce type de modèles (le « modèle géométrique ») parmi les « analogies physiques ». De façon générique, Maxwell entend par modèle - ou « analogie physique » - cette « similitude partielle entre les lois d'une science et celles d'une autre, et qui fait que chacune des deux illustre l'autre »⁸.

Toutefois, dans le cas du type d'analogie physico-mathématique que constitue le modèle géométrique, le physicien ne fait aucune hypothèse physique réelle concernant l'existence supposée de quelques lignes de force que ce soit. La visée du modèle est bien précise et limitée. Ainsi la « fonction potentielle », par exemple, qui découle de cette lecture géométrique de Faraday, n'est conçue par Maxwell que comme une « abstraction mathématique » qui permet de « clarifier nos conceptions » et de « diriger notre attention » vers les propriétés réelles de l'espace⁹.

Au contraire pour Maxwell, dans le cas du modèle des boules dures s'entrechoquant tel qu'il est utilisé en physique statistique et en théorie des gaz, le gaz fait l'objet d'une hypothèse physique au sens strict. Les particules sont traitées comme si elles étaient

³ Cf. (Schmid 1998).

⁴ Cf. (Sinaceur 1991).

⁵ Pour ces réflexions sur Maxwell, je m'inspire grandement des analyses très précises de (Harman 1998).

⁶ *Op. cit.*, p. 71.

⁷ *Ibid.*

⁸ *Ibid.*, p. 88.

⁹ *Ibid.*, p. 73.

approximativement des sphères dures. Le modèle est bien là aussi une analogie physique. Mais il vaut dans ce cas non comme une abstraction mathématique mais comme une approximation physique dans laquelle on construit et on manipule une idéalisation physique de la réalité. Selon Boltzmann, de tels modèles atomistiques sont même essentiels. Mais ils ne sont pas non plus à prendre au pied de la lettre. En revanche, ils sont nécessaires pour comprendre non le réel, mais les équations mathématiques qui deviennent de plus en plus abstraites et indirectement interprétable en termes d'observables pour l'homme. Selon Boltzmann, le modèle - ou analogie physique - reste indispensable en ce qu'il permet la représentation visuelle (ou figurative) d'un calcul dont les termes abstraits tendent sinon à ne plus donner prise à notre capacité de visualiser les mécanismes qui sont à l'œuvre dans le calcul.

Ainsi donc, c'est surtout à partir de la crise des représentations mécanistiques en électromagnétisme et des travaux de Faraday, puis surtout de Maxwell, Hertz¹⁰ et Boltzmann que la notion de modèle a pris le sens figuré qu'il a aujourd'hui encore dans les sciences.

Cependant, c'est à partir du début du 20^{ème} siècle – et surtout après la seconde guerre mondiale – qu'à cet usage figuré de la notion de modèle physique est venu s'ajouter un mouvement de formalisation des modèles (Bouleau 1998, Varenne 2004, Varenne 2008a). Le terme modèle a même fini par désigner essentiellement et par défaut un modèle formel, à savoir un construit symbolique, logique ou, le plus souvent, mathématique : une équation, un système d'équations, des contraintes formelles diverses, un algorithme...

Les mathématiques descriptives, les statistiques, l'essor de la biométrie notamment, ont contribué à ce mouvement de formalisation des modèles¹¹. Ce que le statisticien et biométricien Ronald Fisher appelait encore en 1922 une « loi mathématique hypothétique » fut appelé, dans les années 40, un modèle statistique pour l'analyse de données. C'est notamment grâce au concept de « population hypothétique infinie » que Fisher construisit une fiction permettant d'assurer l'exactitude dans l'estimation statistique. Le caractère hypothétique de cette population d'événements probables, venu de l'interprétation fréquentiste de la probabilité, se transmet en effet au construit mathématique. Ce dernier en hérite pour devenir un « modèle statistique ».

Dans ce cas, le réalisme ou la ressemblance du modèle avec la réalité physique n'est plus du tout ce qui est recherché : au contraire, le modèle doit être un pur outil mathématique

¹⁰ Cf. par exemple (Hertz 1996), pp. 67-68.

¹¹ Cf. (MacKenzie 1981), (Giegerenzer *et al.* 1989), (Varenne 2004).

pour être un bon instrument d'interrogation des expérimentations complexes, complexes au sens où elles font intervenir un grand nombre de facteurs interdépendants.

En résumé donc, on observe deux mouvements relativement récents : 1) à partir du 19^{ème} siècle une extension de la signification du terme vers un sens figuré : un modèle physique ou mathématique illustre une théorie, l'interprète, ou même en tient lieu quand la théorie est absente ; le modèle côtoie alors les notions de lois et de théorie ; il n'est plus nécessairement du côté de l'expérience déléguée ; 2) on observe que les modèles se formalisent de plus en plus ; ce qui permet d'accentuer un peu plus encore le mouvement de déracinement des modèles par rapport au monde physique : le modèle formel peut ainsi valoir comme une pure fiction mathématique ou comme une simple grille d'analyse de données. Il est alors un instrument pour l'interprétation de l'expérience plutôt que pour l'interprétation de la théorie.

Que conclure de cette évolution sémantique à la fois considérable et multiple ? Comment mieux définir la notion de modèle ? Une définition serait en effet bienvenue car elle serait le premier pas d'une approche épistémologique un peu structurée.

II- Les modèles : état des lieux

1- une caractérisation minimale plutôt qu'une définition

Au vu de cette diversité, il est en réalité impossible de donner une définition parfaitement stable et consensuelle du terme de modèle. On peut néanmoins en donner une caractérisation minimale. Celle que je vais utiliser a souvent été citée ces dernières années par les chercheurs travaillant en modélisation des systèmes complexes, qu'ils étudient des systèmes complexes physiques, biologiques ou sociaux.

Elle a été proposée pour la première fois par le modélisateur et informaticien Marvin Minsky en 1965 :

« Pour un observateur B , un objet A^ est un modèle d'un objet A , dans la mesure où B peut utiliser A^* pour répondre à des questions qui l'intéressent au sujet de A ».*

Elle me paraît être la caractérisation la moins exclusive et la plus large, même si, comme toute caractérisation large qui ne peut prétendre être une définition, elle ne circonscrit

pas les seuls modèles mais parfois aussi les théories. On a même un contre-exemple littéraire venu d'Edmond Rostand : si $B = \text{Cyrano}$, $A = \text{Roxanne}$, alors $A^* = \text{Christian}$.

Que nous enseigne néanmoins cette caractérisation minimale ?

1) Tout d'abord, premier constat : un modèle n'est pas nécessairement une représentation. Il n'est pas nécessairement une reproduction matérielle tendant à ressembler à ce qu'il modélise.

2) Deuxième constat : tout modèle relève d'une double relativité.

D'une part, un modèle n'est pas indépendant d'un utilisateur, d'un observateur. Le modèle d'un objet n'est modèle de cet objet que pour un observateur particulier, avec son point de vue et ses problématiques. Ce qui permet de qualifier un objet de modèle, c'est donc le fait qu'il y ait au moins un observateur qui décide de s'en emparer et de le concevoir comme modèle. Il n'y a donc pas de modèle en soi.

D'autre part, un observateur étant défini, un modèle ne subsiste pas non plus indépendamment d'une observation effective et d'un questionnement particulier de cet observateur. Un modèle sert à répondre à une question ou à un ensemble de questions définies. On lit ainsi dans bon nombre d'articles que la première étape d'une modélisation consiste en la formulation précise de la question préalablement posée, ainsi que de l'objectif de modélisation.

3) Troisième constat : le modèle est lui-même un objet.

Cela semble curieux au vu de ce que l'on a dit du mouvement massif de formalisation des modèles. Mais ce terme d'objet n'est pas à prendre en son sens naïf : il ne dénote pas nécessairement une entité concrète ou physiquement existante. On peut réaliser des modèles mathématiques de systèmes physiques ou des modèles physiques d'équations mathématiques (comme cela s'est vu avec les calculateurs analogiques qui ont précédé nos ordinateurs).

Mais en revanche, en affirmant que le modèle est un objet, Minsky souligne quelque chose de très juste : conçu souvent (mais pas toujours) à partir de similitudes physiques ou d'analogies de structures, le modèle est davantage qu'un simple *analogon*. Même lorsqu'il est seulement symbolique ou abstrait, il n'est jamais le simple terme d'une relation analogique car on lui suppose toujours aussi une existence autonome. Aux yeux de son utilisateur, tout modèle possède une forte indépendance ontologique qui l'apparente à un objet. Il a en ce sens

une vie propre. C'est même en cela qu'il nous intéresse. C'est en cela qu'il devient utile, comme il devient, dans le même mouvement, à la fois potentiellement fascinant et trompeur.

Ce que j'ai proposé d'appeler ailleurs¹² le déracinement des formalismes à l'ère des modèles s'explique ainsi par le mouvement de formalisation des modèles, auquel vient s'adjoindre ce mouvement d'objectivation du formel, le modèle semblant non seulement rompre les amarres par rapport au réel mais devenir aussi un autre réel à la place du réel.

- 4) Quatrième constat : l'existence du modèle se justifie toujours par le fait qu'il facilite - ou, dit-on souvent, simplifie - la réponse à une question.

On en a souvent un peu vite déduit que tout modèle, dès lors qu'il doit simplifier un questionnement, doit être lui-même simple. Il s'agit là d'un glissement d'attribution indu. Puisque l'usage du modèle est relatif (à un observateur et à un questionnement), on ne peut dire que le modèle doit être un objet simple en lui-même ou dans l'absolu. Il convient donc de regarder sous quel aspect exactement il doit apparaître simplificateur, sous quel aspect il devient un outil facilitateur, un outil de facilitation. On verra alors que certains modèles à certains égards très complexes (comme on en voit aujourd'hui de plus en plus) peuvent être, à d'autres égards, des outils de facilitation pour les questions qui se posent au sujet de certains systèmes réels.

Au point où nous en sommes de notre analyse, on comprend déjà qu'un modèle n'est pas ce qui est recherché en tant que tel, mais ce qui facilite la recherche d'information au sujet d'un système réel ou fictif, cela dans le cadre d'un processus à visée de représentation, de connaissance, de conceptualisation, de conception ou encore de transformation. Il est le moyen plus que la fin. C'est pourquoi je m'aventurerai, à partir de maintenant, à user plutôt du terme de facilitation que de celui de simplification en élargissant la signification sinon restrictive de ce terme (la facilitation étant la capacité de médiation que possède un leader dans un groupe) pour le rendre opérant dans le cas du modèle. Je rejoins par là une grande partie des épistémologues actuels qui voient dans tout modèle avant tout un système symbolique médiateur (Morgan & Morrison, 1999). Mais j'ajouterai simplement que c'est un système médiateur utile à quelque chose de défini bien que prenant des formes multiples. C'est-à-dire que je soutiendrai, *a minima*, que sa médiation remplit elle-même une fonction générique mais spécifiable à chaque fois : une fonction de facilitation. La notion de

¹² (Varenne 2004).

facilitation a l'avantage de prendre explicitement ce trait complémentaire en compte, d'en spécifier la nature, à côté de celle de médiation.

5) Cinquième constat : c'est à partir de cette caractérisation minimale qu'il devient possible de donner une liste assez étendue des types de modèles.

Il suffit en effet de procéder à partir du type de médiation qui est facilitée. Ce que nous pouvons faire dès maintenant dans le paragraphe suivant.

2- une typologie des modèles

À partir de la caractérisation donnée plus haut et d'une déclinaison des différents types de médiation facilitée que l'on peut rencontrer dans la littérature, voici un essai de typologie des modèles (qui ne prétend pas à l'exhaustivité).

Premièrement. Un modèle peut d'abord servir à faciliter une accession à ce qui se donne de manière sensible, mesurable ou détectable. Il peut ainsi faciliter une observation, une visualisation, mais aussi le rendu d'une expérience ou d'une expérimentation. Il peut :

- 1) rendre sensible, accessible au cinq sens (visuelle, palpable...) ce qui ne l'est pas naturellement (maquette du système solaire, maquette de dinosaure, écorché du laboratoire d'anatomie...)
- 2) rendre mémorisable (modèles pédagogiques, diagrammes,...)
- 3) faciliter l'expérimentation systématique en se concentrant sur un objet dont la mise à disposition est plus facile que l'objet qu'il modélise. La disponibilité en est plus grande pour des raisons financières, matérielles, techniques, morales ou encore déontologiques : modèles biologiques vivants (la drosophile, le miniporc, *E. Coli*...).
- 4) servir non de représentation à proprement parler, mais d'outil d'interrogation d'une expérimentation dont on a reconnu auparavant la complexité, c'est-à-dire notamment la multiplicité et l'intrication des causes pour un même phénomène. Ce sont par exemple les modèles statistiques liés à des plans d'expérience en agronomie (Fisher selon Legay 1997).

Deuxièmement. Un modèle peut ensuite faciliter une présentation intelligible de l'objet modélisé *via* une représentation mentale ou une conceptualisation. Il peut :

- 5) faciliter la compression de données ou la condensation d'informations pour la mobilisation et l'utilisation futures d'un ensemble d'informations disparates : modèles de données, modèles statistiques.
- 6) faciliter la sélection et la classification des entités pertinentes dans un domaine de connaissance : modèles conceptuels, modèles de connaissance, ontologies d'un domaine. C'est le cas, par exemple, des ontologies biomédicales en biologie systémique (Roux-Rouquié *et al.* 2007).
- 7) faciliter la reproduction intelligible d'un comportement observable, mesurable ou détectable : modèle phénoménologique, modèle pour la prédiction. Notons qu'un modèle peut être prédictif sans être explicatif : comme le rappelle Jean-Marie Legay, « *après n jours de beau temps, le jour n+1 a d'autant plus de chance d'être beau que n est plus grand* »¹³.
- 8) expliquer un mécanisme en explicitant et en donnant à voir (pour notre imagerie mentale) un scénario d'interaction par une représentation sélective de certains éléments et de certaines interactions simples : modèle explicatif (de type mécaniste)
Cas du modèle de la double hélice de l'ADN selon Watson et Crick.
- 9) faire comprendre un principe en indiquant de manière ramassée l'essentiel de ce qui gouverne l'allure générale d'une dynamique proche d'une dynamique réellement observée, en donnant à voir en particulier la réalisation ou l'émergence de comportements optimaux, d'attracteurs, de variations orientées. Ex. : modèles théoriques de type systèmes dynamiques pour la compréhension des grands principes de la morphogénèse.

¹³ (Legay 1997), p. 43.

Remarquons qu'un modèle explicatif - ou même un modèle théorique - n'est pas une théorie même s'il peut constituer un chemin vers une théorie mature. Par théorie, on désignera en général un large ensemble d'énoncés - éventuellement formalisés et axiomatisés -, reliés systématiquement entre eux, formant système donc, et donnant lieu à des inférences susceptibles de valoir de manière générique pour un type de phénomènes donné.

Un modèle théorique ou explicatif, en revanche, se contente de formuler de manière hypothétique l'existence de contraintes formelles plus ou moins locales sur des interactions spécifiques. Un modèle en ce sens reste un ensemble de « *contraintes particulières sur des interactions* » (Livet 2007). Mais il est clair qu'un modèle peut servir à faciliter une théorisation, c'est-à-dire tant la construction d'une théorie que son interprétation ou son utilisation. C'est même un des principaux usages des modèles aujourd'hui.

Troisièmement. On évoquera donc là un troisième type de médiation facilitante assurée par les modèles. Par rapport à l'entreprise de théorisation, le modèle peut servir en effet à :

- 10) Elaborer progressivement une théorie non encore mature en proposant des explorations conceptuelles hypothétiques et ponctuellement liées à des données partiellement disponibles.
- 11) Interpréter une théorie, en montrant la représentabilité en termes d'images mentales (Hertz, Boltzmann), comme cela fut tenté pour les équations de l'électromagnétisme. L'imagination est alors convoquée pour nous faciliter la représentation des mécanismes du calcul et non pour nous faciliter la représentation directe des mécanismes du réel.
- 12) Illustrer une théorie donnée en indiquant ses analogies avec une autre théorie (Maxwell). Etienne Guyon (1997) rappelle que se fonder sur ces analogies formelles permet des changements d'échelles, des réductions du nombre de variables ou encore des correspondances réglées entre des phénomènes de natures différentes (ex. : électricité / mécanique des fluides)¹⁴.

¹⁴ (Guyon 1997), p. 109.

13) Tester la cohérence interne d'une théorie (cas des théories mathématiques ou physico-mathématiques). Cet usage a été développé en lien avec la théorie des modèles valant en logique et en mathématiques, et donc en lien avec les théorèmes associés.

14) Permettre l'applicabilité de la théorie, i.e. son calcul puis sa reconnexion avec le réel. C'est le cas, par exemple, des modèles en mécanique des fluides ou encore des modèles de phénomènes de combustion présentant des turbulences. Dans ce dernier cas, on dispose bien des équations théoriques de Navier-Stokes pour les écoulements de gaz ou de fluides. Mais, le plus souvent, comme l'explique le spécialiste des modèles de combustion, Roland Borghi, « *les échelles de temps et d'espace des variations des variables sont si petites (par rapport à l'échelle de temps et d'espace du dispositif pratique à calculer) que les équations de bilan ne peuvent être utilisées en pratique : d'une part elles nécessiteraient des calculs numériques beaucoup trop longs et beaucoup trop lourds en mémoire, et d'autre part il serait impossible de comparer un calcul à une expérience, car le détail des conditions aux limites et initiales nécessaire au calcul ne serait pas accessible dans l'expérience* »¹⁵. Ainsi, Radyadour Kh. Zeytounian rappelle-t-il que la modélisation asymptotique permet de produire de manière systématique et rationnelle, c'est-à-dire « *en avançant pas à pas dans la hiérarchie des approximations* »¹⁶ (cela à la différence des modèles d'approximation *ad hoc*), des « *formes approchées, simplifiées, du modèle exact de Navier-Stokes lorsque les paramètres réduits, sans dimensions, prennent leur valeurs limites* »¹⁷. Dans ce contexte, ce sont les modèles qui semblent plus proches du réel. Pour l'épistémologue Nancy Cartwright (1983), on peut ainsi aller jusqu'à dire que, par contraste avec les modèles, les lois et les théories générales sont des construits abstraits sans prise directe sur le réel, sans contenu empirique. Les théories ne sont pour Cartwright que des guides conceptuels servant à trouver des modèles applicables.

15) Faciliter l'hybridation de plusieurs théories en en permettant le calcul conjoint dans des cas où les systèmes physiques sont hétérogènes et où les théories ne sont pas simultanément applicables. C'est le cas, par exemple, des modèles de transformations physico-chimiques dans les systèmes polyphase, c'est-à-dire avec divers constituants

¹⁵ (Borghi 1985), pp. 3-4.

¹⁶ (Zeytounian 1994), p. 32.

¹⁷ (Zeytounian 1994), p. 3.

simultanément en phase liquide, solide et gazeuse. Pour le chimiste et thermodynamicien Michel Soustelle, une telle modélisation est « *un jeu de construction qui décompose les phénomènes en éléments simples et en refait la synthèse. La complexité ainsi diminuée, les comportements naturels sont ainsi ramenés à un combinaison d'un petit nombre de comportements simples* »¹⁸.

Quatrièmement. Un modèle peut aussi servir d'instrument médiateur entre différentes disciplines, entre différents domaines du savoir, ou entre 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'acteurs 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 questionnement. Comme outil de facilitation d'une médiation entre discours, 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. Ce sont des modèles qui servent à :

- 16) Faciliter la communication, comme les outils pédagogiques ou les outils de traduction... Certains modèles sont vus comme des « trading-zones » (Galison 1997), des zones d'échanges et de transaction entre des conceptions du monde ou des langages différents.
- 17) Faciliter la délibération et la concertation. C'est le cas du modèle *RAINS* qui sert même parfois seulement à ce que s'établisse le contact entre des communautés de chercheurs qui jusque là ne se parlaient pas (Kieken 2004).
- 18) Faciliter la co-construction des solutions de gestion des systèmes complexes par les acteurs de ces systèmes ; faire que les acteurs s'approprient ainsi les modèles et les stratégies élaborées en cette occasion. C'est l'objectif de la « modélisation d'accompagnement » ou « modélisation interactive » où les experts en modélisation

¹⁸ (Soustelle 1990), p. 12.

sociale individus-centrée se mêlent aux acteurs d'un système agro-économique et leur donnent la parole, les font jouer leur rôles et les rendent ainsi co-auteurs des reformulations des problématiques locales (cf. le travail de François Bousquet et du collectif ComMod - *Companion Modelling* - au CIRAD)¹⁹.

Cinquièmement. Il y a enfin les modèles qui ne servent pas tant à faire une représentation valable ou 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. Ces modèles peuvent servir à :

19) Faciliter la détermination d'une décision ou d'une action collective. Ce sont les modèles d'action publique en cas d'épidémie ou de catastrophe. C'est le cas des modèles interdisciplinaires de gestion d'épidémie comme celle de la bilharziose (selon Legay, 1997).

20) Faciliter la décision d'un achat ou d'une vente en la fondant sur une hypothèse d'hétérogénéité et donc de mutuelle compensation des représentations collectives et des croyances à son sujet. Ex. : modèles en économie et en finance, modèles de gestion du risque financier.

Dans ce dernier cas, les modèles se prétendent représentationnels mais ils le sont de manière illusoire. Ils font illusion car ils sont très souvent auto-réalisateurs (Mackenzie 2004) : ils font être la réalité qu'ils décrivent. D'autre part, restant le plus souvent mathématiques, ils sont d'une complexité limitée et ainsi relativement aisément manipulables et communicables : quoiqu'on en dise, ils n'ont que la sophistication de ces instruments de simplification formelle et d'inférence rapide que sont essentiellement les mathématiques. Ils ne sont donc pas conçus pour rendre compte de l'épaisseur ni de l'hétérogénéité des

¹⁹ Cf. (Bousquet *et al.* 2005).

phénomènes économiques associés pourtant peu ou prou aux phénomènes financiers. On peut donc à bon droit les classer dans les modèles de décision²⁰.

Comme le note Michel Aglietta (2008), par exemple, dans le cas des modèles de marché financier servant à la décision d'achat, « *il y a un processus endogène qui entraîne l'instabilité de la courbe de demande du marché au-delà des aléas exogènes [sinon classiques en économie réelle], c'est l'imitation* » (p. 59). En effet « *chaque opérateur est conduit à se préoccuper du jugement des autres pour améliorer la pertinence de ses anticipations* ». La conséquence en est que l'hétérogénéité des anticipations tend à s'estomper. C'est cette hétérogénéité qui, en temps normal, rend effectif le pouvoir d'autoréalisation des modèles et les rend de fait crédibles. Dans le cas d'un krach, en revanche, c'est « *une augmentation d'intensité de l'influence croisée [via les modèles]* » qui « *provoque une instabilité de la demande agrégée du marché sans rapport avec la volatilité 'naturelle'* », (ibid.)²¹. Dans les cas des modèles de marché, c'est donc bien plutôt le réel construit par le modèle que le modèle lui-même qui s'effondre. Le modèle avait postulé et en même temps créé une réalité partagée dans des croyances subjectives. Mais le modèle est ensuite périodiquement et stratégiquement (donc tout à fait rationnellement) utilisé contre ses propres anticipations auto-réalisatrices. C'est donc le réel que le modèle a incité à créer qui finit par réfuter les anticipations que le modèle continue de faire sur le papier. D'où le caractère cycliquement auto-réfutant de ces modèles sinon habituellement auto-réalisateurs.

III- Les épistémologies des modèles

Avec cette typologie, nous avons rassemblé au moins 20 fonctions de facilitation pour les modèles. Cette liste n'est certainement pas close puisque, comme je l'ai suggéré dans mon bref historique, on note une diversification des emplois des modèles en lien étroit avec l'évolution des techniques et avec la diversification associée de leurs types : ils furent d'abord

²⁰ Cf. (Guesnerie 2008) : « *La modélisation en finance n'a que des rapports lointains avec la modélisation nécessaire à une bonne compréhension des phénomènes économiques (l'offre et la demande, l'interaction entre les marchés, etc.)*. »

²¹ Cf. une analyse comparable dans (Orléan 2009), p. 100 : « *Autrement dit, la corrélation généralisée des réactions individuelles au choc initial nous donne l'exemple d'un processus dont les effets sont hors de proportion avec la cause originelle. C'est suivant ce modèle que nous analysons la crise financière. Si, d'ordinaire, les analystes écartent cette explication, c'est parce qu'ils considèrent que le système économique diffère des systèmes sociaux en raison de son autorégulation concurrentielle et des contre-forces qu'elle produirait automatiquement. C'est précisément ce point que nous contestons. Ces contre-forces n'existent pas ou insuffisamment.* »

matériels, physiques ; ils sont aujourd'hui symboliques, mathématiques et logiques ; ils seront de plus en plus informatiques.

Il n'en demeure pas moins que les épistémologues - s'apparentant à des théoriciens de la science - ont toujours été tentés de se faire une conception unificatrice des modèles, cela au moins pour en tirer des canons, des règles de bon usage. Il est ainsi très classique de voir s'élaborer des épistémologies qui veulent interpréter tous les types de modèles à partir d'un seul type de modèle qu'elles privilégient pour des raisons philosophiques ou métaphysiques. Ainsi l'approche sémantique en épistémologie des modèles est une tentative très courue²² de réduire les modèles scientifiques aux modèles entendus au sens de la théorie mathématique et logique des modèles. À l'inverse, et presque au point opposé du spectre épistémologique, les épistémologues qui choisissent de privilégier une lecture sociologique ou pragmatiste s'attachent à démontrer que, finalement, les modèles les plus stabilisés, les modèles d'interprétation théorique, les modèles logiques eux-mêmes sont eux aussi le résultat de négociations sociales serrées bien qu'inaperçues et que ces modèles relèvent donc tous plus ou moins d'un type de modélisation interactive où des effets de négociation et de recrutement des pairs ont lieu. La leçon qu'il faut tirer de ces réductionnismes épistémologiques est qu'on ne se met pas réellement à l'écoute de la créativité de la science si l'on anticipe le réel que l'on va découvrir au moyen d'une conception unique de l'*épistémè*, c'est-à-dire si l'on recouvre le réel de la diversité des pratiques des modèles sous une conception unique de la connaissance ou de l'action facilitée par le modèle.

Il n'en demeure pas moins que la variété des épistémologies des modèles montre assez que l'entreprise d'unification eut un succès très relatif. Toutefois, dans ses entreprises épistémologiques diverses et parfois contradictoires, on décèle des constantes illustrées par des débats récurrents. Je n'en citerai que quelques uns : le débat sur le rôle des images dans la connaissance, le débat sur le caractère constitutif du ou des langages dans notre vision du monde, le débat sur l'interdisciplinarité nécessaire ou non dans la construction des sciences du complexe, le débat sur la possibilité d'une connaissance universelle ou seulement particulière des phénomènes complexes, le débat sur la construction sociale et interactive des savoirs dans la cité (contre la conception d'une science occidentale - voire masculine - enfermée dans sa tour d'ivoire et conférant une toute puissance opaque aux experts issus de ses rangs, etc.).

L'histoire même des épistémologies des modèles témoigne de ces oscillations autour de thèmes constants mais dont les enjeux sociétaux peuvent à chaque fois varier, selon le

²² Pour une présentation historique de ces épistémologies, cf. (Moulines 2006), chapitre 6.

contexte historique. Faute de place, je n'évoquerai ici que quelques points de débats récurrents.

1) La peur des images : les critiques des modèles physiques

Les philosophes ont très souvent critiqué les modèles. Cela a été d'autant plus vrai lorsque leur essor s'est avéré dans les sciences, soit à partir de la fin du 19^{ème} siècle, comme on l'a dit. À l'époque contemporaine, les modèles ont d'abord été critiqués par les philosophes parce qu'ils les voyaient – avec une certaine mauvaise foi, parfois – non comme des instruments de médiation parmi d'autres, mais comme des représentations définitives, de pures images menaçant de fasciner et de figer la pensée. Très tôt, les analogies physiques des physiciens de l'électromagnétisme (ressorts, poulies, caoutchouc...) ont été critiquées au motif qu'elles valorisaient indûment l'imagination et qu'elles paralysaient ainsi l'invention logique et mathématique, la seule qui vaille pour le progrès des théories, par exemple, selon Duhem (1914). Duhem prolongeait ainsi la condamnation pascalienne de l'imagination pour tout processus de connaissance.

Dans le même ordre d'idées, les modèle-images ont été critiqués par des philosophies d'inspiration non plus pascalienne mais dialectique : les modèles donnaient pour elles la fausse impression que la science était une connaissance par images alors que l'histoire des sciences montraient que la science progresse en niant ses modèles, c'est-à-dire en brisant tour à tour toutes ses images comme autant d'idoles. Ainsi en a-t-il été du modèle de l'atome de Bohr selon Bachelard (1934).

2) La peur des idéologies : les critiques des modèles formels

Dans les années 1960, en France, les épistémologues critiques des modèles ont dû faire face au vaste mouvement de formalisation des modèles, y compris dans les sciences humaines comme en linguistique ou en anthropologie. Ils ont dû adapter leurs discours et, en suivant une ligne de pensée comme celle de Lénine (1908), ils ont déplacé leur critique en l'étendant à la dénonciation non de l'imagination, mais, plus largement, de l'idéologie : pour Louis Althusser (1974) comme pour Alain Badiou (1969), croire que la science est une connaissance par modèles, c'est tomber sous l'emprise d'une idéologie, c'est-à-dire sous l'emprise d'un système figé de pensées qui donne faussement l'impression d'avoir des raisons autonomes bien fondées mais qui est en réalité un produit dérivé et inaperçu des rapports de

domination matériel entre les classes sociales. Les seuls modèles qui valent vraiment pour Badiou sont alors non seulement les modèles non figuratifs mais surtout les modèles non interdisciplinaires, à savoir ceux qui sont en usage dans la seule théorie mathématique des modèles.

Pour Georges Canguilhem aussi, il faut se méfier des modèles, en particulier en biologie : « illustration n'est pas figuration » dit-il. Il soutient qu'il n'y a de modèles acceptables en science que comme interprétation d'une théorie et donc, qu'en biologie en particulier - où on ne trouve pas, selon lui, de véritable théorie comme en physique -, il n'y a pas réellement de modèle recevable (Canguilhem 1968).

Le modélisateur et biométricien Jean-Marie Legay (1973), sensible à toutes ces critiques, proposera une solution radicale influente en défendant l'idée qu'aucun modèle n'est essentiellement une représentation, mais que tout modèle n'est qu'un instrument pour l'expérimentation, l'interrogation et la transformation du monde. Legay sera ainsi l'un des premiers à défendre une épistémologie des modèles radicalement anti-représentationnaliste et pragmatiste.

3) Les théories épistémologiques générales : le modèle du langage pour penser les modèles²³

Dans le même temps, les épistémologues anglo-saxons répondent au mouvement de formalisation des modèles, non par une critique des modèles en général, mais par une adaptation des discours de légitimation tels qu'ils avaient cours depuis Boltzmann. Puisque les modèles sont entre-temps devenus massivement formels, c'est pour l'essentiel en pensant tout modèle en référence à un langage – et ensuite à un fait de langue -, qu'ils expliqueront le pouvoir épistémique des modèles. Pour Max Black (1962), par exemple le modèle scientifique n'est plus seulement une illustration. Il est une métaphore, c'est-à-dire une figure de style. Il est un exercice de l'imagination certes, mais porté par le langage, et qui vise à proposer des implications et des explications nouvelles autrement non formulables dans le langage traditionnellement employé pour le domaine modélisé.

À partir des premiers travaux de Patrick Suppes (1961), suivent alors de nombreuses épistémologies sémantiques des modèles : elles s'opposent aux épistémologies syntaxiques antérieures selon lesquelles une science devait avant tout viser à élaborer des théories au sens de systèmes syntaxiques d'énoncés parfaitement axiomatisés. Pour ces épistémologues, les

²³ Cf. (Varenne 2006) pour un historique succinct de ces épistémologies linguistiques des modèles.

modèles viennent au premier plan dans la construction scientifique. Même s'ils ne sont pas pensés à l'image d'une phrase et si – dans cette conception sémantique inspirée de la théorie mathématique des modèles – un modèle est un *n-uplet* dans lequel on trouve des objets, des relations et des opérations (van Fraassen 1980), tout modèle reste pensé par référence à une théorie. Tout modèle reste ainsi encore lié étroitement à une conceptualisation générative, homogène et unitaire d'un système de représentation (Varenne 2006).

C'est la raison pour laquelle, de manière prévisible, devant l'essor des modèles dans des problématiques indépendantes de toute entreprise de théorisation, l'épistémologie sémantique des modèles, ayant supplanté l'épistémologie syntaxique des théories, a, depuis les années 1990, laissé la place à une constellation d'épistémologies pragmatistes des modèles où l'emphase est portée non sur la théorie, mais sur la pratique et sur l'action. Toutefois, pour la plupart, ce sont des épistémologies pour lesquelles un modèle relève encore pleinement d'un acte de langage et pour lesquelles c'est donc encore et toujours le langage qui sert de métaphore voire de point d'ancrage pour penser tout type de modèle. On voit là finalement la scansion des différentes dimensions du langage : quand l'approche syntaxique échoue à expliquer la science, on passe à une approche sémantique qui, quand elle échoue, passe à une approche pragmatiste.

Il est vrai qu'on ne peut contester une chose : une épistémologie pragmatiste donnant un fort poids à l'acte de langage que constitue un modèle - jusqu'à prendre en considération le contexte social déterminant la signification et la portée de cet acte de langage - est mieux à même d'expliquer la fonction épistémologique de ce que l'on a appelé les modèles de communication, de concertation, de délibération, d'accompagnement, de décision ou d'action. Il n'en résulte pas pour autant que tout modèle soit de cet ordre. Mais entre-temps, comme j'ai essayé de le montrer dans (Varenne 2007), le fait que, dans certains cas, des simulations informatiques complexes aient volé durablement la vedette aux traditionnels modèles mathématiques impose aux épistémologues une révision profonde de l'emphase portée sur la seule métaphore du langage quand il s'agit de penser tout type de modèles et de simulations.

En quoi le nouvel essor des simulations impose-t-il en effet un élargissement supplémentaire du regard épistémologique qu'on porte depuis quelques décennies sur les techniques de modélisation en sciences ?

Cet essor semble rééquilibrer et quelque peu contrecarrer le mouvement de formalisation des modèles physiques qui a eu cours au début du 20^{ème} siècle. Avec les simulations informatiques, c'est en effet à nouveau la peur des images séductrices et trompeuses qui peut être réactivée, quasiment comme à la fin du 19^{ème} siècle, et qui peut

servir à raviver des critiques sévères à l'encontre des nouvelles formes de simulation. Beaucoup de modélisateurs traditionnels eux-mêmes (pratiquant la modélisation mathématique) se sont élevés contre la pratique des simulations informatiques dans leurs domaines. Ce fut le cas, notamment en modélisation pour la biométrie et l'agronomie dans les années 1990. C'est actuellement le cas dans les sciences sociales.

Au départ, pourtant, la simulation par ordinateur n'est qu'une dépendance d'un modèle. Elle n'en est encore souvent que le calcul numérique. Comment en est-on arrivé là ? C'est que, comme pour les modèles, il y a plusieurs grands types de simulation sur ordinateur qu'on ne doit plus confondre.

IV- Les simulations

1- Bref historique

Pendant longtemps, le terme « simulation » n'a servi à désigner qu'un type particulier de modèle : un modèle à la fois physique et phénoménologique. Une simulation a donc d'abord été conçue comme un modèle non symbolique, c'est-à-dire un modèle présentant une réalisation physique d'une part, dont le principe de fonctionnement, d'autre part, ne vise pas à imiter celui de l'objet modélisé, mais dont les performances observables (la phénoménologie) visent, en revanche, à imiter les performances observables de l'objet modélisé.

Par exemple, on peut simuler une explosion volcanique avec des réactions chimiques, comme le proposent certains ateliers pédagogiques pour enfants alors même qu'une telle explosion dans la réalité n'est pas le résultat de réactions chimiques à proprement parler. Ainsi parle-t-on encore en ce sens de simulateur de vol, de simulateur de conduite. Un jeu de rôle pour l'entraînement au management, un exercice d'alerte et d'évacuation sont également des simulations au sens où les motivations profondes des acteurs ne peuvent être les mêmes que celles qui animent les managers décisionnaires réellement en exercice ou les victimes réelles d'un incendie, d'un naufrage ou d'une agression chimique.

En première approximation donc, on peut dire qu'on modélise quand on ne sait pas théoriser et qu'on simule quand on ne sait pas modéliser, c'est-à-dire quand on n'a pas de modèle explicatif ! Si bien que la peur de voir s'éloigner le réel d'un degré supplémentaire semble justifiée : la simulation serait là pour donner le change lorsqu'on ne s'inquiète même plus d'expliquer, ne serait-ce que partiellement.

En même temps, et de manière apparemment paradoxale, la simulation se voit critiquée pour une raison inverse : on constate qu'elle possède un « faible degré d'autonomie par rapport au réel » car, comme le dit Etienne Guyon, « elle doit coller le plus possible à la réalité » au contraire de la « modélisation qui possède une beaucoup plus grande autonomie par rapport au réel qui l'a inspiré »²⁴.

L'apparent paradoxe peut être levé si l'on comprend que, dans un cas, on reproche à la simulation d'oublier la réalité de l'explication et que, dans l'autre cas, on lui reproche d'être trop aliénée au réel immédiatement observable et mesurable. Il ne s'agit donc pas du même réel : d'un côté, c'est le réel au sens de l'explication vraie, du mécanisme caché mais supposé bien réellement à l'œuvre derrière les apparences et les phénomènes mesurables (phénomènes auxquels on confère implicitement un moindre degré de réalité), de l'autre, c'est le réel au sens du donné immédiat, observable mais non conceptualisé ni même rapporté à ses causes. Je ferai observer ici que, dans le reproche de trop coller au réel observable, il y a le recours à une vieille hypothèse d'origine aristotélicienne qui voudrait que la cause soit plus réelle que ce qu'elle cause, car plus éminente et virtuellement capable de plus. Les préférences pour la modélisation mathématique et son caractère de virtualité par rapport à la simulation informatique prennent souvent racine dans cette conception épistémologique²⁵.

On doit cependant objecter à l'impression première que la simulation nous donne et selon laquelle elle serait employée quand la modélisation n'est plus possible, que les simulations dites « numériques » n'apparaissent justement pas quand il n'y a pas de modèle. Au contraire : elles sont bien souvent des calculs de modèles. Cependant, elles apparaissent quand il n'y a pas de calcul formel de ce modèle. Elles calculent des modèles mathématiques non traitables analytiquement. C'est-à-dire qu'il n'existe pas de méthode plus courte pour évaluer leur résultat que de simuler pas à pas le comportement du modèle à échelle infinitésimale. En ce sens, elles sont des modèles phénoménologiques du comportement microscopique du modèle, même si elles n'en sont plus nécessairement des modèles physiques. Leur substrat est symbolique, mais elles modélisent bien des performances, et seulement des performances, à cette échelle microscopique.

De là peut s'expliquer le rapport - qui peut paraître sinon énigmatique au profane - entre le calcul de modèle et le retour à l'iconicité, la visualisation et la figuration dans les

²⁴ (Guyon 1997), p. 107.

²⁵ C'est une version de cette thèse que modernise l'épistémologue Gilles-Gaston Granger lorsqu'il confère une éminence particulière au virtuel mathématique par opposition au virtuel des simulations. C'est ce qui l'autorise à minorer l'importance des simulations contemporaines, mais aussi à ne pas prendre toute la mesure des innovations épistémologiques qu'elles imposent. Cf. (Granger 1995), (Granger 2001).

simulations informatiques contemporaines, sans que ce soit pour autant un retour à une matérialité puisque la simulation sur ordinateur n'est plus qu'une manipulation de symboles et non un modèle physique à proprement parler : calculer consiste dans ce cas à faire figurer des éléments de manière quasi-réaliste, éléments dont les comportements cumulés seuls importeront pour le résultat global.

Notons qu'on n'a pas attendu les ordinateurs pour faire calculer des simulateurs. Ainsi on peut créer des simulateurs électriques d'oscillateurs mécaniques : là non plus, le substrat en jeu n'est pas le même ; mais les lois phénoménologiques sont les mêmes et les performances mesurables sont donc les mêmes. Avant l'essor des ordinateurs ou calculateurs numériques programmables, les calculateurs analogiques fonctionnaient comme des simulateurs analogiques de ce type : c'était déjà des simulateurs pour le calcul, mais des simulateurs physiques, non symboliques.

Comme l'a montré Peter Galison (1997), les premières simulations numériques (donc symboliques) massivement assistées par ordinateur ont été effectuées en physique nucléaire, à Los Alamos. Elles imitaient, dans les cases mémoires de l'ordinateur, le comportement individuel et aléatoire des neutrons et rendaient solubles des équations autrement non traitables.

En conséquence, on comprend que les simulations numériques puissent être encore appelées des simulations : elles ont certes perdu la contrainte d'être des modèles physiques ; mais elles ont conservé leur fonction de résolution de modèle par le moyen d'une imitation pas à pas de comportements visibles locaux (non nécessairement interprétés), locaux dans le temps comme dans l'espace.

2- Tendances actuelles en simulation

Un autre problème, cependant, est qu'il existe des simulations sur ordinateur qui ne simulent pas réellement un modèle au sens propre. Les simulations directement fondées sur des algorithmes (c'est-à-dire sur un ensemble fini de règles) ne sont pas fondées sur un modèle au sens d'un objet formel abouti et défini (comme une équation close) que l'on interrogerait ensuite au moyen d'une analyse numérique. On lit certes souvent dans la littérature que les règles de ces simulations sont des « modèles de simulation ». Mais cela n'en fait pas des modèles au sens de l'objet abouti tel qu'évoqué dans notre caractérisation, mais plutôt au sens de générateurs de simulations.

Ce qui est simulé, ce n'est donc plus le modèle à proprement parler, mais directement le réel ou l'objet visé par la simulation. Ainsi, par exemple, en économie cognitive, les agents informatiques ont des règles de comportements proches de celles qu'on suppose aux agents économiques : le modèle de simulation vise une ressemblance terme à terme. Selon Bernard Walliser (2008), la simulation permet dans ces conditions une modélisation qu'on peut dire iconique. On peut appliquer cette remarque à la plupart des simulations multi-agents en sciences sociales et en économie, aujourd'hui. Dans ces simulations que j'ai proposé d'appeler algorithmiques (Varenne 2007), le modèle n'est que l'instrument de la simulation alors que dans les simulations numériques traditionnelles, c'est la simulation qui est l'instrument du modèle.

Ces simulations algorithmiques se sont considérablement développées - surtout dans les sciences biologiques et dans les sciences humaines et sociales - à partir des idées venues de l'intelligence artificielle distribuée et surtout des techniques de programmation orientées objets. On comprend pourquoi : la simulation peut y être le résultat de l'interaction d'une myriade d'objets ou d'agents informatiques spécifiques et hétérogènes.

Enfin, une des autres tendances récentes de la simulation montre que la simulation sur ordinateur ne sert pas seulement à calculer un modèle ni même à simuler directement le réel au moyen d'un modèle unique de règles de simulation, mais qu'elle sert aussi à simuler un réel complexe au moyen d'une multiplicité de modèles mathématiques ou de simulation imbriqués pas à pas. Ces simulations nouvelles mettent en œuvre une multiplicité de formalismes concurrents. On peut les dire pluriformalisées en ce sens (Varenne 2007). Elles servent à hybrider plusieurs modèles mathématiques ou logiques. Elles prolongent certes l'entreprise des modèles hybridant les théories (voir le cas déjà cité). Mais alors que les modèles hybridant des théories s'affrontent seulement à l'obstacle de ne pouvoir résoudre et calculer conjointement les différentes théories en présence (du fait de simples problèmes de conditions aux limites ou de paramètres négligés ou non), les simulations pluriformalisées se confrontent à l'impossibilité même de formuler mathématiquement et conjointement les interactions entre ces modèles. Ces simulations sont confrontées plus fondamentalement à des incompatibilités axiomatiques. Il leur faut donc simuler les comportements locaux de chacun des différents sous-modèles, cela en les discrétisant dans l'espace et dans le temps, pour les faire recombiner pas à pas par l'ordinateur.

On observe dans ce cas la prévalence du langage informatique et de la méthode de programmation : la simulation à événements discrets et la simulation à base de multi-

modélisation procèdent de cet esprit²⁶. Ce sont alors des objets informatiques, des ontologies informatiques, qui sont fondamentaux, et non des structures mathématiques. Ces objets doivent d'abord être définis en premier pour être ceux qui permettent un horizon d'homogénéisation minimal ainsi que la communication entre les modèles différemment axiomatisés. C'est pourquoi j'ai proposé d'appeler ces simulations des simulations informatiques au sens fort (elles sont fondées sur l'infrastructure formelle que constituent le langage informatique et les ontologies associées), cela pour les distinguer des simulations numériques et des simulations algorithmiques.

3- Essai de typologie

À côté des traditionnelles simulations physiques (qui sont encore en usage), nous avons donc affaire aujourd'hui à au moins trois grands types de simulations sur ordinateur :

- 1) Les simulations numériques qui sont des calculs approchés de modèles : dans ce cas, c'est le comportement local d'un modèle qui est mis en « boîte noire » et simulé pas à pas.
- 2) Les simulations algorithmiques qui sont fondées sur des systèmes de règles (un « modèle de simulation ») simulant chacune localement un comportement visible et qui opèrent en cumulant leurs interactions et leurs itérations.
- 3) Les simulations informatiques pluriformalisées qui simulent le comportement local minimal recevable de chacun des sous-modèles d'un ensemble de sous-modèles diversement formalisés, comportement recevable, c'est-à-dire *interprétable pour et communicable* à chacun des autres sous-modèles du même ensemble.

Dans le cas des simulations informatiques, ce qui est simulé pas à pas, c'est le comportement recevable d'un modèle pour un autre modèle. Ce n'est donc ni le comportement local d'un modèle qui est simulé pour lui-même, ni le comportement local du réel, mais le comportement d'un modèle pour un autre modèle, cela de manière à rendre co-

²⁶ Cf. (Coquillard & Hill 1997), (Zeigler *et al.* 2000).

calculable un ensemble de sous-modèles valant à des échelles ou à des points de vue distincts pour une même situation ou un même phénomène complexe. Les simulations informatiques complexes sont fondées ainsi sur des facilitations relatives : elles rendent accessibles des modes d'expression de sous-modèles pour d'autres sous-modèles.

Conclusion :

Les philosophes ont certes critiqué les modèles. Mais, comme on s'en doute, ils ont bien davantage encore condamné la simulation, puisque traditionnellement, elle a semblé n'être qu'un type de modélisation qui avoue sans détour son caractère superficiel et pragmatique, et qui semble même avouer - et accepter donc - la facilité avec laquelle on peut l'instrumentaliser si l'on veut en faire le promoteur de nouvelles idéologies ou de nouvelles superstitions aliénantes. La simulation serait la victoire de la surface, du clinquant, contre le travail honnête et désintéressé de la profondeur dans les modèles explicatifs et la théorisation. De fait bien des spécialistes en simulation pour les sciences et techniques sont accusés, sur leur lieu même de travail, de ne pas faire de la vraie science mais simplement de belles images pour séduire.

Que conclure de notre bref périple autour des modèles et des simulations ?

Certes, la perte du réel est un risque incontestable. Et les modèles servent parfois autant à nous raconter une histoire²⁷ - pour nous endormir peut-être - qu'à nous rendre maîtres de notre destin. Mais le problème est que, contrairement à ce que des épistémologies générales nous ont incité à penser jusqu'à présent, à l'analyse, il ne se révèle absolument pas trivial de savoir *a priori* d'où la perte du réel peut venir. À cet égard, il est erroné de condamner tout uniment la simulation, ou encore tel ou tel type de modèle ou de simulation. Même si je n'ai pu le montrer en détail ici, certaines simulations éloignent de certains niveaux du réel alors qu'elles nous rapprochent de certains autres niveaux. Pour d'autres types de simulations, c'est exactement l'inverse. Certaines simulations, loin de nous enfermer dans le réel immédiat, permettent même des explorations conceptuelles que les modèles ne permettaient pas. Il apparaît ainsi que l'épistémologie des modèles et des simulations exige aujourd'hui des élaborations conceptuelles au plus près des travaux scientifiques, car elle

²⁷ Selon l'hypothèse interprétative - elle aussi classique - selon laquelle un modèle est non seulement un fait de langues, mais plus précisément encore une histoire, voire un récit fictif, mais à pouvoir heuristique et de suggestion. Cette hypothèse a été reprise récemment par (Morgan 2002). Voir aussi (Grenier *et al.* 2001).

exige un travail non plus de réduction ou de généralisation surplombante, mais un travail de discrimination critique, de distinction et d'affinement des analyses conceptuelles.

Avec la démultiplication des méthodes de modélisation et de simulation, cela se comprend. Les chemins de la référence²⁸ au réel - et donc les chemins du retour au réel - pour de tels construits formels sont devenus très indirects et complexes. Ils nous sont donc bien moins intuitifs que par le passé. D'où l'impression que le réel s'est absenté, qu'il a été congédié, aux yeux d'une épistémologie trop pressée. Mais, le plus souvent, ces chemins de retour ne disparaissent pas, loin de là : l'informatique est en elle-même une technologie de l'enchevêtrement délégué - mais maîtrisable - des chemins de la référence au réel, comme de la référence aux divers aspects et aux diverses échelles du réel observable ou concevable (Varenne 2009a).

L'histoire des sciences récentes montre que certaines simulations algorithmiques - précisément parce qu'elles étaient porteuses d'une dimension iconique inédite, c'est-à-dire d'un réalisme local inaccessible aux modèles mathématiques traditionnels - ont été admises comme des réfutations de théorie, presque au même titre qu'une expérimentation réelle. C'est le cas des simulations algorithmiques de Thomas Schelling (1978)²⁹. De manière complémentaire, ce sont parfois les modèles mathématiques qui peuvent être plus éloignés du réel que les simulations puisqu'ils nécessitent des idéalizations supplémentaires, cela pour permettre ne serait-ce qu'une formulation uniforme.

À tel point qu'il est sans doute préférable d'opposer en général non les modèles au réel ni même les modèles aux simulations mais un « mauvais » virtuel à un « bon » virtuel : le mauvais virtuel - celui qui oublie le réel - peut être le fait aussi bien de modèles mathématiques (excès d'idéalisation, insuffisance du nombre des paramètres, défaut de validation) que de simulations (pas de fondement empirique dans des échantillons mesurés ou des modèles de données, défaut de robustesse). Le mauvais virtuel est par exemple celui qui, en mathématisant directement, fait fi de l'épaisseur et du caractère pluriaspectuel d'un phénomène complexe quand il y aurait lieu de le prendre en compte dès le départ, comme cela semble être le cas pour bien des phénomènes économiques et financiers.

Mais cette frontière elle-même reste relative à l'objectif visé : elle dépend de ce que l'on attend du modèle et de la simulation (voir la caractérisation de Minsky) : en attend-on,

²⁸ Pour cette notion, voir (Goodman 1981).

²⁹ Même si elles sont encore très controversées, ces simulations ont bousculé les théories sociologiques sur la ségrégation raciale dans les villes. Fondés sur des techniques d'automates cellulaires, elles font voir - sur écran - que la ségrégation raciale n'impose pas que soit à l'œuvre un fort racisme larvé, mais seulement des préférences jouant légèrement au-dessus de l'indifférence totale à la couleur de peau du voisin.

par exemple, une simple exploration conceptuelle ou - pour prendre l'autre cas extrême - un terrain empirique virtuel sur lequel on pourra effectuer de véritables expérimentations par délégation, à savoir sur des machines ?³⁰ Là encore, l'attention aux techniques précises à chaque fois mises en œuvre et la discrimination des cas doivent fonder une approche épistémologique elle-même attentive au réel, cela si l'on veut éviter de pratiquer une épistémologie théorique oubliant bien souvent le réel qui devrait la concerner, c'est-à-dire la réelle diversité comme aussi la pertinence par nature variable des pratiques de modélisation et de simulation.

Références bibliographiques :

- Achinstein, P. (1968) : *Concepts of Science – A philosophical analysis*, London, The Johns Hopkins Press.
- Aglietta, M. (2008) : *Macroéconomie financière*, Paris, La Découverte, 5^{ème} édition.
- Althusser, L. (1974) : *Philosophie et philosophie spontanée des savants (1967)*, série de cours donnés à l'ENS en 1967, Paris, Maspero.
- Armatte, M. & Dahan-Dalmedico, A. (2004) : « Modèles et modélisations, 1950-2000 : Nouvelles pratiques, nouveaux enjeux », *Revue d'histoire des sciences*, Tome 57, vol. 2, 243-303.
- Bachelard, G. (1934) : *Le nouvel esprit scientifique*, PUF.
- Bachelard, S. (1979) : « Quelques aspects historiques des notions de modèle et de justification des modèles, in Delattre, P. & Thellier, M., *Elaboration et justification des modèles*, Paris, Maloine, 1979, Tome I, 3-19.
- Badiou, A. (1969) : *Le concept de modèle*, Paris, Maspero.
- Barberousse, A. (2000) : *La physique face à la probabilité*, Paris, Vrin.
- Black, M. (1962) : *Models and Metaphors – Studies in Language and Philosophy*, Ithaca and London, Cornell University Press.
- Boltzmann, L. (1902) : « Model », *Encyclopaedia Britannica*, 11^{ème} édition, London, 1902, pp. 213-220.
- Borghini, R., Clavin, P., Linan, A., Pelce, P. & Sivanshinsky, G.I. (dir.) (1985) : *Modélisation des phénomènes de combustion*, Paris, Eyrolles, 1985.
- Bouleau, N. (1999) : *Philosophies des mathématiques et de la modélisation*, Paris, l'Harmattan.
- Bousquet F., Trébuil, G. & Hardy B. (2005) : *Companion Modeling and Multi-Agent Systems for Integrated Natural Resource Management in Asia*, Cirad & International Rice Research Institute, Los Baños, Laguna, Philippines.
- Brissaud M., Forsé, M. & Sighed, A. (1990) : *La modélisation, confluent des sciences*, Paris, Editions du CNRS, 1990.

³⁰ Pour une typologie plus détaillée des fonctions épistémiques des simulations (la simulation comme exploration conceptuelle, monde crédible, test empirique de modèle ou encore, comme terrain empirique virtuel) au regard de leurs modes d'enchevêtrement chaque fois distincts des chemins de la référence, voir (Phan & Varenne 2008).

- Canguilhem, G. (1968) : « Modèles et analogies dans la découverte en biologie », in G. Canguilhem, *Etudes d'histoire et de philosophie des sciences concernant les vivants et la vie*, Paris, Vrin, 305-318.
- Cartwright, N. (1983) : *How the Laws of Physics lie*, Oxford, Oxford University Press.
- Coquillard, P. & Hill, D. (1997) : *Modélisations et simulations d'écosystèmes*, Paris, Masson, 1997.
- Dahan-Dalmedico, A. (dir.) (2007) : *Les modèles du futur*, Paris, La Découverte.
- Dugas, R. (1959) : *La théorie physique au sens de Boltzmann*, Neuchâtel, éditions du Griffon, distribution : Paris, Dunod.
- Duhem, P. (1914) : *La théorie physique – son objet – sa structure*, Paris.
- Fisher, R. A. (1922) : “On the Mathematical Foundations of Theoretical Statistics”, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, A, 1922, vol. 222, pp. 309-368.
- Frigg, R. & Hartmann, S. (2006) : “Models in Science”, in Edward N. Zalta (ed.), *Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Spring 2006 Edition), article disponible gratuitement en ligne à l'adresse suivante : <http://plato.stanford.edu/archives/spr2006/entries/models-science/>
- Galison, P. (1997) : *Image and Logic*, Chicago, The University of Chicago Press.
- Giegerenzer, G., Swijtnik, Z., Porter, T. Daston, L., Beatty, J. & Krüger, L. (1989), *The Empire of Chance – How probability changed science and everyday life*, Cambridge, Cambridge University Press, Ideas in context.
- Goodman, N. (1981) : “Routes of Reference”, *Critical Inquiry*, vol. 8, n°1, 121-132.
- Granger, G. G. (1995) : *Le probable, le possible et le virtuel*, Paris, Odile Jacob.
- Granger, G. G. (2001) : *Sciences et réalité*, Paris, Odile Jacob.
- Grenier, J. Y., Grignon, C. & Menger, P. M. (dir.) (2001) : *Le modèle et le récit*, Paris, Editions de la Maison des sciences de l'homme.
- Guesnerie, R. (2008) : « L'économie fait plus peur en France que dans d'autres pays », entretien publié dans *Le Monde*, 18 novembre 2008, supplément économie, p. vi.
- Guillaume, M., (1971), *Modèles économiques*, Paris, PUF.
- Guyon, E. (1997) : « Modélisation et expérimentation », in G. Cohen-Tannoudji (dir.), *Virtualité et réalité dans les sciences*, Paris, Diderot Multimédia, 1997, 101-126.
- Harman, P. M. (1998) : *The Natural Philosophy of James Clerk Maxwell*, Cambridge (UK), Cambridge University Press.
- Hartmann, S. (1996), “The World as a Process: Simulation in the Natural and Social Sciences”, in Hegselmann, R., Mueller, U. & Troitsch, K. (eds.), *Modelling and Simulation in the Social Sciences from the Philosophy of Science Point of View*, Dordrecht, Boston, London, Kluwer Academic Publisher, 77-100.
- Hertz, H. : *Die Prinzipien der Mechanik in neuem Zusammenhange dargestellt (1891-1894)*, Frankfurt am Main, Verlag Harri Deutsch, 1996.
- Israel, G. (1996) : *La mathématisation du réel*, Paris, Seuil.
- Kieken, H. (2004) : « RAINS : Modéliser les pollutions atmosphériques pour la négociation internationale », *Revue d'histoire des Sciences*, Tome 57, vol. 2, 379-408.
- Kingsland, S. E. (1985), *Modeling Nature – Episodes in the History of Population Ecology*, Chicago and London, The University of Chicago Press.

- Kupiec, J. J., Lecointre, G., Silberstein, M. & Varenne, F. (dir.) (2008) : *Modèles, simulations, systèmes*, Paris, Editions Syllepse, Matière Première n°3.
- Legay, J. M. (1973) : « La méthode des modèles, état actuel de la méthode expérimentale », *Informatique et Biosphère*, vol. 1, 1973, 5-73.
- Legay, J. M. (1997) : *L'expérience et le modèle. Un discours sur la méthode*, Paris, INRA éditions.
- Legay, J. M. & Schmid, A. F. (2004) : *Philosophie de l'interdisciplinarité – Correspondance sur la recherche scientifique, la modélisation et les objets complexes*, Paris, Edition Petra.
- Lénine, V. I. (1908, 1973), *Matérialisme et empiriocriticisme*, Moscou, Editions du progrès, 1908 ; traduction : Paris, Editions sociales, Paris, 1973.
- Livet, P. (2007) : “Towards an Epistemology of Multi-agent Simulations in social Sciences”, in Phan & Amblard (2007), 169-193.
- MacKenzie, D. A. (1981) : *Statistics in Britain*, Edinburgh, Edinburgh University Press.
- MacKenzie, D. A. (2004): “Models of Markets: Finance theory and the historical sociology of arbitrage”, *Revue d'histoire des Sciences*, Tome 57, vol. 2, 407-431.
- Mäki, U. (ed.)(2002) : *Fact and Fiction in Economics - Models, Realism and Social Construction*, Cambridge (UK), Cambridge University Press.
- Morgan M. S. (2002) : “Models, Stories and the economic World”, in Mäki (ed.) (2002), 178-201.
- Morgan, M. S. & Morrison, M. (eds.) (1999) : *Models as Mediators*, Cambridge (UK), Cambridge University Press.
- Minsky, M. (1965) : “Matter, Mind and Models”, *Proc. of IFIP Congress*, 45-49.
- Moulines, C. U (2006) : *La philosophie des sciences*, Paris, Editions rue d'Ulm.
- Nouvel, P. (dir.) (2002) : *Enquête sur le concept de modèle*, Paris, PUF.
- Orange, C. (1997), *Problèmes et modélisation en biologie*, Paris, PUF.
- Orléan, A. (2009), *De l'euphorie à la panique – Penser la crise financière*, Paris, Editions rue d'Ulm.
- Parrochia, D. (2000) : « L'expérience dans les sciences : modèles et simulation », in *Qu'est-ce que la vie ?*, Université de tous les savoirs, Paris, Odile Jacob, 193-203.
- Phan, D. & Amblard, F. (2007) : *Agent-Based Modelling and Simulation in the Social and Human Sciences*, Oxford, The Bardwell Press, 2007.
- Phan, D. & Varenne, F. (2008) : “Agent-Based Models and Simulations in Economics and Social Sciences: from conceptual exploration to distinct ways of experimenting”, *Proc. of EPOS 08*, 3rd edition of *Epistemological Perspectives On Simulation*, ISCTE, ADETTI, University of Lisbon, 2008, 51-69. Preprint en ligne.
- Roux-Rouquié, M. (dir.) (2007) : *Biologie systémique. Standards et modèles*, Paris, Omniscience.
- Sauvan, J. (1966), « Méthode des modèles et connaissance analogique », *Revue d'Agressologie*, 7, 1, 9-18.
- Schelling, T. S. (1978) : *Micromotives and Macrobehaviour*, New York, Norton and Co.
- Schmid, A. F. (1998), *L'âge de l'épistémologie*, Paris, Kimè.
- Sinaceur, H. (1991) : *Corps et modèles – Essai sur l'histoire de l'algèbre réelle*, Paris, Vrin.
- Soustelle, M. (1990) : *Modélisation macroscopique des transformations physico-chimiques*, Paris, Masson.

- Suppes, P. (1961) : “A Comparison of the Meaning and the Uses of Models in Mathematics and the empirical Sciences”, in H. Freudenthal (ed.), *The Concept and the Role of the Model in Mathematics and Natural and Social Sciences*, Dordrecht, D. Reidel Publishing Company, 163-177.
- Treuil, J. P., Lobry, C., Millier, C., Müller, J. P. & Hervé, D. (2007), « De l'équation au programme informatique, dialogue entre mathématiciens et informaticiens », *Natures Sciences Sociétés*, 15 : 33-43.
- Van Fraassen, B. (1980) : *The scientific Image*, Oxford, Clarendon Press.
- Varenne, F. (2001) : “What does a computer simulation prove ?”, in Giambiasi, N. & Frydman, C. (eds.), *Simulation in industry – ESS 2001*, Proc. of the 13th European Simulation Symposium, SCS Europe Bvba, Ghent, 549-554. Article accessible en ligne à l'adresse suivante : http://wwwlisc.clermont.cemagref.fr/animation/magestyc/Fonds_documentaire/Fondsdoc/resumes/Varenne2001.pdf
- Varenne, F. (2003) : « La simulation informatique face à la méthode des modèles », *Natures Sciences Sociétés*, vol. 11, n°1, 16-28. Accessible sur : <http://www.sciencedirect.com/science/journal/12401307>
- Varenne, F. (2004) : *Le destin des formalismes : à propos de la forme des plantes - Pratiques et épistémologies des modèles face à l'ordinateur*, Thèse de l'université de Lyon 2, dir. G. Ramunni.
- Varenne, F. (2006) : *Les notions de métaphore et d'analogie dans les épistémologies des modèles et des simulations*, Paris, Editions Petra.
- Varenne, F. (2007) : *Du modèle à la simulation informatique*, Paris, Vrin, 2007.
- Varenne, F. (2008a) : « Fragmenter les modèles : simulation numérique et simulation informatique », in P.-A. Miquel (éd.), *Biologie du 21ème siècle - Evolution des concepts fondateurs*, Bruxelles, De Boeck Université, 265-295.
- Varenne, F. (2008b) : « Modèles et simulations : pluriformaliser, simuler, remathématiser », in J.J. Kupiec *et al.*, 153-180.
- Varenne, F. (2009a) : *Qu'est-ce que l'informatique ?*, Paris, Vrin, à paraître en 2009.
- Varenne, F. (2009b) : “Models and Simulations in the Historical Emergence of the Science of Complexity”, in Aziz-Alaoui, M. A. & Bertelle, C. (eds.), *From System Complexity to Emergent Properties*, Berlin, Springer, pp. 3-21.
- Vérin, H. (1993), *La gloire des ingénieurs – L'intelligence technique du XVIème au XVIIIème siècle*, Paris, Albin Michel.
- Wagensberg, J. (1997), *Ideas sobre la complejidad del mundo*, Barcelone, Tusquets Editores, 1985 ; traduction : *L'âme de la méduse – Idées sur la complexité du monde*, Paris, Seuil.
- Walliser, B. (2008) : « Les modèles de l'économie cognitive », in Kupiec *et al.*, *Modèles, simulations, systèmes*, Paris, Syllepse, 183-199.
- Winsberg, E. (1999) : “Sanctioning models: the epistemology of simulation”, *Science in context*, 12, 275-292.
- Winsberg, E. (2008) : “A Tale of two Methods”, *Synthese*, en ligne, à paraître.
- Zeigler, B. P., Praehofer, H. & Kim Tag, G. (2000) : *Theory of Modeling and Simulation. Integrating Discrete Event and Continuous Complex Dynamic Systems*, 2nd edition, New York, Academic Press.
- Zeytounian, R. Kh. (1994) : *Modélisation asymptotique en mécanique des fluides newtoniens*, Berlin, Springer.