



HAL
open science

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

Franck Varenne

► **To cite this version:**

Franck Varenne. Modèles et simulations dans l'enquête scientifique : variétés traditionnelles et mutations contemporaines. Franck Varenne; Marc Silberstein. Modéliser & simuler. Epistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation, Tome 1, Editions Matériologiques, pp. 11-49, 2013, 978-2-919694-37-2. halshs-03080674

HAL Id: halshs-03080674

<https://shs.hal.science/halshs-03080674>

Submitted on 17 Dec 2020

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.

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

par Franck Varenne – Université de Rouen – France

Preprint du chapitre paru sous ce titre en 2013. Merci de le citer de la façon suivante :

Franck Varenne, « **Modèles et simulations dans l'enquête scientifique : variétés traditionnelles et mutations contemporaines** », in Franck Varenne, Marc Silberstein (dir.), *Modéliser & simuler. Epistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation*, tome 1, Paris, Editions Matériologiques, 2013, pp. 11-49.

Site de l'éditeur : <https://materilogiques.com/fr/>

Modéliser et simuler en science consiste en l'utilisation de modèles et de simulations dans le cadre d'une enquête de connaissance¹. Dans un tel contexte, le but visé n'est pas prioritairement esthétique – comme pour l'art du portrait ou de la sculpture – ni non plus d'agrément, comme c'est le cas aujourd'hui de la majorité des simulations utilisées dans les jeux vidéo. Les verbes « modéliser » et « simuler » nous renvoient donc dans un premier temps aux substantifs « modèle » et « simulation ». En quoi consiste un modèle ou une simulation ? Comment les définir ou, au moins, les caractériser ? Cela paraît difficile. Or, comment donner une cohérence à cet ouvrage s'il nous est impossible d'invoquer autre chose qu'une unité purement verbale derrière les mots-clés qui figurent dans son titre

¹ La littérature méthodologique et épistémologique sur les modèles est considérable. Nous ne pouvons faire mieux ici que de renvoyer à la bibliographie régulièrement mise à jour de l'article de Roman Frigg et Stephan Hartmann, "Scientific models", *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, <http://plato.stanford.edu/entries/models-science/>, mais aussi à certaines contributions importantes dont, des plus anciennes au plus récentes : Bernard Walliser, *Systèmes et modèles*, Paris, Seuil, 1977 ; Rainer Hegselmann (ed.), *Modeling and Simulation in the Social Sciences from the Philosophy of Science Point of View*, Dordrecht, Theory and Decision Library, 1996 ; Peter Galison, *Image and Logic*, Chicago University Press, 1997 ; Mary S. Morgan et Margaret Morrison (eds), *Models As Mediators*, Cambridge, Cambridge University Press, 1999 ; Uskali Mäki (ed.), *Fact and Fiction in Economics: Models, Realism and social Construction*, Cambridge Ma., Cambridge University Press, 2002 ; Michel Armatte & Amy Dahan-Dalmedico, *Modèles et modélisations (1950-2000)*, n° spécial de la *Revue d'Histoire des Sciences*, 2004, 57(2) ; Paul Humphreys, *Extending Ourselves*, Oxford University Press, 2004 ; Amy Dahan-Dalmedico, A. (dir.) *Les modèles du futur*, Paris, La Découverte, 2007 ; Paul Humphreys et Cyrille Imbert (eds.), *Models, Simulations and Representations*, New York, Routledge, 2011 ; Bernard Walliser, *Comment raisonnent les économistes – Les fonctions des modèles*, Paris, Odile Jacob, 2011. Certains des travaux anciens, mais influents, des années 1880 aux années 1980 sont assez largement cités et analysés dans notre ouvrage : Franck Varenne, *Théorie, réalité modèle – Epistémologie des théories et des modèles face au réalisme dans les sciences*, Editions Matériologiques, 2012, <http://www.materilogiques.com/Theorie-realite-modele>. Depuis trois décennies au moins, de nombreux numéros spéciaux de revues ainsi que des actes de colloque sont régulièrement consacrés à ces sujets. C'est probablement du côté des modélisateurs et simulateurs informatiques que la réflexion est la plus riche, la plus ouverte et la plus avancée tant il est vrai que l'informatique prend aujourd'hui ce rôle fédérateur en sciences que seules les mathématiques remplissaient auparavant. Voir par exemple le bilan remarquable de Tüncer I. Ören, « Toward the Body of Knowledge of Modeling and Simulation », *Interservice/Industry Training, Simulation and Education Conference (IITSEC)*, Orlando, Florida, 2005, p. 1-19 http://www.sim-summit.org/BoK07/BOK_Attachments/M&SBOK-version-2-2005-08-06.pdf. Du côté de l'épistémologie appliquée et de la méthodologie des simulations en science sociale, par exemple, on peut citer les numéros spéciaux suivants : Ulrich Frank & Klaus G. Troitzsch, "Epistemological Perspectives on Simulation", *JASSS*, 8(4), 2005 <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/8/4/7.html> ; David Nuno, Caldas José Castro & Coelho Helder, "Epistemological Perspectives on Simulation – EPOS III", *JASSS*, 13(1), 2010 <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/13/1/14.html>. EPOS II (2006) a quant à lui été publié dans Flaminio Squazzoni (ed.), *Epistemological Aspects of Computer Simulation in the Social Sciences*, Berlin, Springer Verlag, 2009. Le site internet qui fournit aujourd'hui le plus d'informations bibliographiques en matière de philosophie des sciences sur ces sujets est <http://philpapers.org/>. Les articles recherchés avec les mots-clés « model » OU « simulation » y sont en très grand nombre : en avril 2013, le moteur de ce site en recense bien plus de 1000, même si près du tiers des articles trouvés ne parlent pas en fait de modèle ni de simulation au sens scientifique où nous le comprenons ici.

et qui sont constamment mobilisés dans ses chapitres ? Davantage : comment les définir indépendamment même de la pratique et de la visée de connaissance précises dans lesquelles ils s'inscrivent chaque fois : nous sommes donc dangereusement reconduits des substantifs aux verbes, des modèles à la pratique de modélisation.

En première analyse, toutefois, il nous paraît que l'on peut raisonnablement sortir du cercle en remarquant que, *dans l'acte d'utiliser un modèle ou une simulation scientifique, il s'agit toujours de manipuler, de modifier ou de construire un objet, vivant ou non, matériel ou formel, en vue de répondre à un certain nombre de questions relevant d'une enquête de connaissance.* Mais cette caractérisation n'est-elle pas trop large ? Dans *Cyrano de Bergerac* d'Edmond Rostand, Cyrano se sert de Christian pour connaître les sentiments de Roxane : cela fait-il de Christian un modèle de Roxane au sens où nous l'entendons ici ? Christian y est un intermédiaire mais pas un modèle. On lit certes souvent que les modèles sont, à certains égards, des intermédiaires. Nous y reviendrons. Mais avec ce cas-limite étrange, nous voyons que nous ne pouvons en rester à une caractérisation aussi générale, d'autant plus qu'on n'y trouverait nul moyen de distinguer clairement entre modèle et simulation, ce qui est aussi un des apports majeurs que l'on peut légitimement attendre de cet ouvrage.

Par conséquent, dans cette introduction, afin d'augmenter les chances que la lecture des contributions de ce panorama collectif soit réellement profitable à celui qui s'y consacre et, en particulier, afin que la diversité des approches soit reconnue, comprise et appréciée, nous ne reculerons pas devant la tâche de proposer quelques distinctions conceptuelles et quelques classifications susceptibles d'éclairer le lecteur, au moins donc une grille de lecture raisonnée et non, bien sûr, une épistémologie des modèles tout armée ou définitive. Cette grille de lecture se voudra la plus ouverte possible. Nous ne l'avons d'ailleurs nullement imposée aux contributeurs lors de la communication du projet éditorial. Mais, au vu des contributions que nous avons pu réunir, et qui constituent un ensemble conçu comme pertinemment articulé et cohérent et non comme une simple juxtaposition d'exemples disciplinaires, nous croyons qu'elle pourra se révéler un point de départ utile pour le lecteur.

Conformément à cet objectif donc, dans les sections suivantes de ce chapitre introductif, nous allons d'abord caractériser plus précisément les modèles scientifiques, puis leurs différents types, puis les simulations et leurs variétés. Les différents rapports entre modèle et simulation seront ensuite évoqués. Pour finir, nous proposerons non pas un résumé des contributions, ce qui serait inutilement fastidieux étant donné leur nombre, mais un essai de caractérisation raisonnée de leurs différents types.

I. Les modèles scientifiques²

Au lieu de commencer à caractériser les modèles en partant de leurs natures, de ce dont ils sont faits ou même de leurs principes (*i.e.* de ce qui leur permet d'assurer la fonction que nous en attendons), nous allons ici partir délibérément de leur seule fonction. Nous verrons qu'elle est déjà assez difficile à cerner. Ensuite seulement, nous évoquerons leurs natures et leurs principes eu égard à cette fonction.

² Ce passage s'inspire de la caractérisation des modèles et de leur classification en vingt types telles que nous les avons présentées au colloque de décembre 2008 intitulé « Modèles : jusqu'où va le réel ? » et organisé par la Société Française de Physique. Une première présentation publiée de cette classification a été faite dans Franck Varenne, *Modéliser le social*, Paris, Dunod, 2011, pp. 166-174. Ici, nous l'avons modifiée et mise à jour. D'autres caractérisations ou classifications instructives - ainsi que des réflexions sur les rapports entre lois, théories et modèles ainsi qu'entre modèles - sont bien entendu également proposées dans toutes les contributions de ce collectif. On en trouve plus particulièrement dans les chapitres d'Alain Franc, Giuseppe Longo, Evelyn Fox-Keller, Bernard Walliser, Sébastien Dutreuil, Pierre-Alain Braillard, Frédéric Masset, Hervé Douville et Edith Perrier.

I.1. Fonction générale

En associant la caractérisation de la fonction des modèles scientifiques telle qu'elle est donnée par Marvin Minsky en 1965³ à celle plus récemment proposée par Mary S. Morgan et Margaret Morrison dans la préface de leur ouvrage collectif⁴, on peut parvenir à caractériser le fonction d'un modèle scientifique dans une enquête de connaissance de manière suffisamment large et consensuelle. Un modèle aurait ainsi essentiellement une fonction de médiation disent Morgan et Morrison. Issue au départ d'une fonction de médiation entre l'expérience et la théorie, cette fonction de médiation se serait ensuite généralisée à d'autres rapports de médiation. Nous ajouterions ici qu'un modèle n'est pas n'importe quel objet médiateur. Il existe en effet des objets médiateurs qui font écran à ce qu'il médiatise. En réalité, un modèle scientifique propose une médiation qui doit en même temps avoir la fonction d'une *facilitation* dans le cadre d'une enquête cognitive, enquête qui prend la forme d'une question assez spécifique comme nous l'apprend par ailleurs la caractérisation de Minsky. Un modèle, c'est donc *un objet médiateur qui a pour fonction de faciliter une opération cognitive dans le cadre d'un questionnement orienté*, opération cognitive qui peut être de cognition pratique (manipulation, savoir-faire, apprentissage de geste, de techniques de conduites, etc.) ou théorique (récolte de données, formulation d'hypothèse, hypothèse de mécanismes théoriques, etc.).

I.2. Fonctions spécifiques

À partir d'une telle caractérisation de leur fonction générale, les fonctions spécifiques des modèles peuvent être déclinées au regard des différents *types de médiation facilitante* qu'ils peuvent chaque fois autoriser dans le cadre d'une enquête de connaissance.

I.2.1 Faciliter une expérience

Dans ce contexte de modélisation pour l'expérience, un modèle facilite l'expérience au sens où il facilite l'accès à ce qui peut nous être présenté ou représenté de manière sensible, imaginable, mesurable ou détectable. Il sert alors de terrain substitutif d'observation ou d'expérimentation, terrain lui-même réel ou seulement imaginatif. Quand un modèle de ce type opère seulement en pensée (avec des hypothèses de continuité sur le comportement physique des propriétés), il peut directement être conçu comme une expérience de pensée⁵.

- 1) Rendre accessibles à la *sensibilité* les *propriétés* du système cible qui ne sont pas, ou plus, ou pas encore accessibles par les sens : prototypes, maquettes d'espèces disparues, écorchés, maquettes de nano-robots

³ « 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 », Marvin Minsky : "Matter, Mind and Models", *Proc. of IFIP Congress*, 1965, p. 46 <http://groups.csail.mit.edu/medg/people/doyle/gallery/minsky/mmm.html> . Pour montrer son caractère influent en méthodologie et épistémologie appliquée, on peut faire remarquer que cette caractérisation large est reprise telle quelle aussi bien par la contribution de Hugues Berry et Guillaume Beslon que par celle de Raphaël Duboz et Jean-Pierre Müller.

⁴ Mary S. Morgan et Margaret Morrison (eds), *op.cit.*, 1999 .

⁵ Ainsi, Galilée procède-t-il à un passage à la limite lorsque, par une expérience de pensée reposant sur une hypothèse de continuité, il cherche à prouver que la différence de vitesse de chute libre de deux objets de masses différentes s'annulerait dans le vide parfait : il observe empiriquement que moins le milieu est dense, moins cette différence de vitesse est importante. Et il postule cette continuité pour dire, qu'à la limite, c'est-à-dire dans le vide (qu'il ne peut expérimentalement réaliser), on *observe en pensée* non pas seulement l'amoindrissement *mais* l'annulation même de cette différence. Voir Galileo Galilei, *Discours concernant deux sciences nouvelles* (1638), traduction : Maurice Clavelin, Paris, PUF, 1995, p. 58 (p. 113 dans l'édition italienne officielle). Pour une enquête fouillée sur les expériences de pensées, voir Roy A. Sorensen, *Thought Experiments*, Oxford-New-York, Oxford University Press, 1992.

- 2) Faciliter l'*expérimentation* en la déplaçant sur un *objet substitutif* : modèles expérimentaux en biologie (drosophile, porc, souris, *Arabidopsis*...), modèles physiques analogiques⁶ (maquettes, prototypes...)
- 3) Faciliter la *mémorisation* de ce qui l'est difficilement : par des tableaux, graphes, systèmes visuels symétriques, mélodies ou autres techniques des arts de la mémoire
- 4) Faciliter l'*accès aux données* en servant d'instrument de *présentation condensée de l'information* contenue dans le système cible (outil de résumé, grille de lecture abrégative) : moments statistiques (moyenne, variance, etc.), identification de paramètres de lois statistiques connues. Les méthodologies de l'analyse de données d'inspiration empirico-inductiviste (comme celle de J.P. Benzécri en France) considèrent que la présentation statistique des données n'est pas encore la surimposition d'une forme, donc d'un modèle au sens fort de « moule » formateur, sur les données mais seulement une focalisation active et particulière sur elles. Elle est une façon de présenter sélectivement les données sans les déformer, ni les informer, ni donc les modeler au sens fort.

I.2.2 Faciliter une formulation intelligible

- 5) Faciliter la *compression de données* pour l'élaboration d'un *modèle de données*. Les méthodologies de l'analyse des données et de l'analyse multivariée d'inspiration hypothético-déductiviste (d'origine surtout anglo-saxonne depuis Ronald A. Fisher : Patrick Suppes, W.v.O. Quine) considèrent que toute loi statistique hypothétique permettant de condenser une ou des séries de données est déjà une manière de *modeler activement* les données. C'est toujours selon ce point de vue un *modèle de données* au sens fort. On voit que la différence entre la fonction 4 et la fonction 5 est une question de nature philosophique. Elle peut toutefois avoir des conséquences méthodologiques⁷.
- 6) Faciliter la *sélection des types d'entités, des types de propriétés, des types d'états* ou des *types de processus* du système cible jugés pertinents pour l'enquête scientifique sur le système cible : *modèles conceptuels, modèles de connaissance, ontologies* du domaine d'intérêt.
- 7) Faciliter la *reproduction par des moyens intelligibles, déductifs ou de calcul* des structures de données observables, mesurables ou détectables de certains phénomènes affectant le système cible : *modèles phénoménologiques*, modèles

⁶ Sur les modèles d'ingénieurs destinés à la « monstration des effets », voir Hélène Vérin, *La gloire des ingénieurs – L'intelligence technique du XVIème au XVIIIème siècle*, Paris, Albin Michel, 1993.

⁷ Notamment en matière de justification par les praticiens eux-mêmes de l'emploi des modèles en sciences sociales. En sociologie quantitative, par exemple (voir Varenne, *Modéliser le social*, 2011, *op. cit.*, pp. 143-146), ce débat se poursuit aujourd'hui sur le terrain entre, d'une part, les partisans d'une approche inductive forte qui considèrent que l'Analyse Géométrique des Données sociales (AGD) n'est pas encore une façon de modeler les données et d'y insérer indûment une hypothèse et, d'autre part, les partisans d'une conception de l'analyse statistique qui la voit comme appartenant dès le départ à la boîte à outil des modèles structurants, donc jamais véritablement dénués d'hypothèse théorique. Dans l'ouvrage cité, nous avons essayé de montrer que les textes séminaux de R.A. Fisher peuvent donner raison aux uns comme aux autres, suivant ce que l'on voudra bien entendre par analyse de données. Ce débat méthodologique irrésolu n'est bien sûr pas sans lien avec la question philosophique des interprétations tantôt réalistes tantôt épistémiques des probabilités. Mais il ne s'y réduit pas.

pour la prédiction. Un modèle intelligible n'a en effet pas besoin d'être explicatif pour être prédictif. La détection de corrélations statistiques entre certaines séries de données passées permet de faire des prédictions (à base donc inductive) qui se révèle le plus souvent correctes. L'instrumentalisme (celui de Milton Friedman par exemple en économie) considère qu'un modèle doit en rester à cet objectif de n'être qu'un instrument commode de prédiction.

- 8) Faciliter une explication en facilitant l'*explicitation intelligible d'un mécanisme* supposé à l'œuvre dans le système cible en explicitant les interactions causales supposées au moyen de représentations symboliques (ou imagées) des *éléments entrant en interaction causale* ainsi que des *processus d'interaction* eux-mêmes⁸. Expliquer un phénomène par l'explicitation des mécanismes qui en sont la cause signifie ici « déplier » (comme l'étymologie du verbe « expliquer » l'indique), c'est-à-dire désintriquer et rendre explicite à la fois les éléments et les interactions entre eux.
- 9) Faciliter la *compréhension d'un phénomène affectant le système cible en facilitant l'intellection* - c'est-à-dire une *capacité de représentation conceptuelle permettant un usage inférentiel, déductif ou calculatoire* - d'un *principe général supposé contraindre les états ou les variables de ce système, ainsi que sa dynamique*, en indiquant une loi formelle abrégée ou synthétique portant sur des variables agrégées du système ou des états globaux (ou macroscopiques) plutôt que sur des éléments supposer le composer. Les *modèles mathématiques équationnels de compréhension*, historiquement souvent de nature intégro-différentiels, se voient traditionnellement conférer ce statut. Beaucoup de modèles mathématiques théoriques sont de ce type en physique, mais aussi en dynamique des populations par exemple ou dans certaines théories générales de la morphogenèse : théorie reposant sur des principes d'optimalité ou variationnels, thermodynamique des systèmes ouverts dissipatifs, synergétique, théorie des catastrophes, etc.

I.2.3. Faciliter une théorisation

⁸ Nous nous permettons d'ajouter ici le commentaire que nous faisons à ce sujet dans Varenne, *Modéliser le social*, 2011, *op. cit.*, p. 168 : « Si ce modèle d'interaction est explicité au moyen d'images, il faut que celles-ci soient suffisamment standardisées : sinon notre attention est attirée sur la singularité des images et non sur leurs interactions. Et l'on retombe alors dans l'art de la mémoire, comme c'est le cas de tous les modèles explicatifs de type mécaniste en physique, biologie et sciences sociales. C'est aussi le cas du modèle en double hélice pour l'ADN selon Watson et Crick : il est suffisamment stylisé et on y voit donc bien comment la réplication de l'ADN peut mécaniquement (*i.e.* par *mouvements simples et répétitifs*) opérer. C'est aussi le cas des modèles simples de l'individualisme méthodologique en sociologie, ou de l'acteur rationnel en économie, qui tous s'inspirent au départ de modèles mécanistes de la physique. Il est à noter que la standardisation des images ou des symboles n'est plus une contrainte restrictive lorsque ce modèle d'interaction est supporté et géré par un ordinateur : il devient alors un *modèle computationnel*. Car les symboles, les images (ou représentations iconiques) des éléments en interaction sont pris en charge, dans leur diversité même, par la mémoire de l'ordinateur. Et l'utilisateur peut alors se concentrer sur le résultat de leurs interactions. Dès lors, en quoi est-ce encore une « intelligibilité » que l'ordinateur nous donne par là, si on lui délègue cette *activité d'interaction* sur ces symboles ou images, c'est-à-dire si on ne l'effectue plus nous-même, même par symboles interposés, dans notre propre esprit ? Un certain nombre de chercheurs accordent ainsi peu de poids à cette procédure nouvelle de traitement délégué de symboles ; d'autres, au contraire, considèrent que c'est une nouvelle manière d'*expliquer*, en sciences sociales, qui nous est offerte, comme Joshua Epstein dans son ouvrage *Generative Social Science* (Princeton, Princeton University Press, 2006) ». On voit que l'on touche ici à la question des frontières entre la visualisation, la conceptualisation ou l'explication supposées traditionnelles d'une part, c'est-à-dire centrées sur le fonctionnement d'un cerveau biologique « naturel » ou, en tous les cas, faiblement instrumenté, et la visualisation, conceptualisation ou explication que l'on pourrait dire « augmentées » par machine, d'autre part.

Par contraste avec un modèle, nous définirons une *théorie* comme un système symbolique à visée de connaissance qui permet 1) de formuler, d'interpréter, de coordonner et de combiner dans un langage formel ou non des représentations d'entités, de propriétés et de processus, entités, propriétés et processus jugés élémentaires ou fondamentaux et supposés caractéristiques de tout un domaine donné, 2) qui permet ensuite de comprendre ou expliquer par raisonnement, par déduction ou par calcul l'ensemble – ou tout un secteur – des phénomènes se manifestant dans ce domaine. Un tel système ne naît pas d'un seul coup. Il nécessite des étapes d'élaboration mais aussi des instruments qui permettent l'exercice des propriétés qu'on en attend. Les modèles interviennent à ce stade de diverses manières.

- 10) Faciliter *la première formulation d'une théorie*. Un tel modèle permet par exemple de proposer des schémas explicatifs simplifiés, à portée d'abord locale et prenant la forme de règles ou de systèmes déductifs ou calculatoires simples. Il se cantonne souvent à la mise en ordre d'un ensemble de « contraintes particulières sur des interactions »⁹. Le Modèle de la Rationalité Ordinaire de Raymond Boudon permet ainsi d'expliquer dans un premier temps quelques phénomènes sociaux ciblés. Mais il tend ensuite, selon son auteur, à mener à une authentique Théorie de la Rationalité Ordinaire (TRO)¹⁰ en nous mettant sur la piste de l'explicitation d'axiomes fondamentaux jusque là inaperçus.
- 11) Faciliter *l'interprétation d'une théorie*. Les modèles de Boltzmann en théorie des gaz et certains modèles de Maxwell en électromagnétisme avaient pour fonction de rendre plus visualisables (en termes d'« images mentales » comme l'écrivait Boltzmann, qui suivait en cela Hertz) le fonctionnement même des équations mathématiques. Les conceptions sémantiques des théories que l'on ne peut qu'évoquer ici¹¹ ont mis à l'honneur et ont essayé de systématiser et surtout de rendre plus rigoureux ce recours aux modèles pour l'interprétation d'une théorie. De façon générale, un modèle y est conçu comme un système réglé de représentations d'entités, entités dont la nature peut être dite plus concrète ou plus proche des celles des observables que les entités théoriques (d'où sa filiation avec la conception des modèles de théorie conçus d'abord comme images mentales).
- 12) Faciliter *l'illustration d'une théorie*. Une théorie peut en illustrer une autre en devenant un modèle qui en instancie les relations théoriques principales, mais pas toutes. Maxwell a considéré que c'était aussi un des rôles des modèles par rapport à la théorie. Une théorie peut ainsi être le modèle d'une autre en ce qu'elle en est très exactement une *illustration*. Une illustration n'est pas un exemple¹² : la théorie modélisante n'a pas à dénoter des entités de même nature que la théorie

⁹ Selon l'expression de Pierre Livet dans « Essais d'épistémologie de la simulation multi-agents en sciences sociales », in Frédéric Amblard, Denis Phan, *Modélisation et simulation multi-agents – Applications pour les sciences de l'homme et de la société*, Paris, Hermès, 2007, pp. 193-218.

¹⁰ Raymond Boudon, *La Rationalité*, Paris, PUF, 2009. Selon Boudon, cette théorie visera elle-même à étendre et assouplir la Théorie classique de l'acteur rationnel.

¹¹ Voir à ce sujet les synthèses des ouvrages suivants : Carlos Ulises Moulines, *La philosophie des sciences - L'invention d'une discipline*, Paris, éditions Rue d'Ulm, 2006 ; Marion Vorms, *Qu'est-ce qu'une théorie scientifique ?*, Paris, Vuibert, 2011 ; Varenne, *Théorie, réalité, modèle*, Paris, Editions Matériologiques, 2012 <http://www.materiologiques.com/Theorie-realite-modele>.

¹² Un des textes de base à ce sujet se trouve dans Chaïm Perelman, Lucie Olbrechts-Tyteca, *Traité de l'argumentation (1958)*, 6^{ème} édition, Bruxelles, Editions de l'Université de Bruxelles, 2008, §§78-79, pp. 471-488.

modélisée¹³. Une illustration se fonde seulement sur des *analogies formelles*, i.e. des identités ou similitudes formelles entre des rapports internes à chacune des deux théories formelles. Une illustration a pour fonction épistémique de marquer l'esprit et de l'outiller pour le rendre ensuite à même d'utiliser une théorie générale *déjà donnée*, alors que l'exemple est une structure d'où l'esprit part pour arriver ensuite à concevoir la théorie qu'il exemplifiera (par induction) et qui, comme telle, n'est *pas encore donnée*¹⁴. Avec l'illustration, on cherche souvent à déceler des correspondances réglées entre des phénomènes de natures différentes comme ceux appartenant à l'électricité, d'une part, et ceux appartenant à la mécanique des fluides, d'autre part. Cela permet par exemple d'utiliser des méthodes de simplification ou de résolution déjà connues (par changement d'échelle, réduction du nombre de variables, etc.)¹⁵. C'est cette fonction d'illustration qui est utilisée lorsque certains modèles mécaniques analogiques servent à la résolution de théories d'objets étudiés par ailleurs en astrophysique (voir le chapitre de Thierry Foglizzo dans le tome 2 de *Modéliser & simuler*)¹⁶.

- 13) Faciliter le *test de la cohérence interne d'une théorie*. Une théorie ne doit pas mener à des affirmations contradictoires. Le fait d'instancier dans un modèle d'entités - même fictif - les conséquences jugées plus concrètes de ces affirmations théoriques permet de vérifier si elles peuvent être simultanément portées par une même entité : cela permet de vérifier en retour la cohérence de la théorie et de ses déductions. Cette fonction des modèles est essentielle pour les théories mathématiques et logiques.

- 14) Faciliter l'*applicabilité de la théorie*, c'est-à-dire ses liens de correspondance avec le terrain et les données. Même si pour certains empiristes logiques (dont Nagel), une théorie que l'on veut appliquer n'a à proprement parler besoin que de « règles de correspondances » entre entités théoriques et entités observationnelles, certains amendements plus récents de l'empirisme logique ont montré que les modèles, en tant que véritables construits intermédiaires et pas seulement comme collection de règles de traduction, avaient un rôle indispensable à jouer. À tel point que, pour Nancy Cartwright¹⁷ par exemple, seuls les modèles ont un contenu véritablement empirique et les théories - qu'elle identifie à des lois générales - ne sont pour elles que des guides conventionnels historiquement datés et facilitant l'expression de modèles.

- 15) Faciliter l'*hybridation de plusieurs théories*. Le passage au modèle permet de pratiquer des calculs conjoints dans des cas où les théories en présence valent pour

¹³ Dans ce contexte, la différence souvent inaperçue entre exemple et illustration pourrait permettre de mieux comprendre les enjeux des débats autour de la question de savoir si la sociophysique apporte véritablement ou non un savoir sociologique. Voir Dominique Raynaud, « L'épistémologie sociologique confrontée aux avancées de la physique statistique », in Thierry Martin (dir.), *Les sciences humaines sont-elles des sciences ?*, Paris, Vuibert, 2011, pp. 53-70.

¹⁴ Chaïm Perelman, Lucie Olbrechts-Tyteca, 2008 [1958], *op. cit.*, p. 481.

¹⁵ Voir à ce sujet les analyses d'Etienne Guyon, « Modélisation et expérimentation », in G. Cohen-Tannoudji (dir.), *Virtualité et réalité dans les sciences*, Paris, Diderot Multimédia, 1997, pp. 101-126. Voir en particulier la page 109.

¹⁶ Voir par exemple : Thierry Foglizzo, Frédéric Masset, Jérôme Guilet, Gilles Durand : "A Shallow Water Analogue of the Standing Accretion Shock Instability: Experimental Demonstration and Two-Dimensional Model", *Phys. Rev. Lett.* 108, 051103 (2012) <http://prl.aps.org/abstract/PRL/v108/i5/e051103> ou <http://arxiv.org/abs/1112.3448>

¹⁷ Nancy Cartwright, *How the laws of physics lie*, Oxford, Oxford University Press, 1983.

un système donné ne sont pas formellement homogènes ni simultanément solubles. Certains systèmes hétérogènes par exemple ceux présentant simultanément ou successivement plusieurs phases physiques (liquide, solide, gazeuse) tombent sous le coup de plusieurs théories physiques. Les techniques *ad hoc* ou asymptotiques de modélisation de ces systèmes polyphase ou à phases multiples permettent d'en améliorer la prédiction¹⁸.

I.2.4 Faciliter la communication et la co-construction des savoirs

Un modèle peut faciliter une médiation non pas tant entre différentes capacités cognitives ou entre différents construits ou donnés mobilisés pour une seule capacité cognitive d'un seul sujet connaissant qu'entre différentes disciplines ou différents savoirs propres à différentes communautés humaines participant à l'entreprise scientifique.

- 16) Faciliter *la communication entre acteurs scientifiques*. On pense aux outils de traduction ou de reformulation des représentations théoriques en un langage partagé ou « zone de transaction » (*trading zone*) ou encore « langage créole » comme Peter Galison¹⁹ les nomme. Les modèles conceptuels et les ontologies (assurant aussi la fonction 6) peuvent être mobilisés à cette fin : ils possèdent alors deux fonctions. En fait, comme on le voit ici et comme on pouvait aisément s'en douter, il n'est pas rare qu'un modèle possède plusieurs fonctions de modélisation.
- 17) Faciliter *la délibération et la concertation* entre parties prenantes travaillant autour d'un même modèle mais n'ayant pas la même question de connaissance à poser au système cible. Dans ce cas, le modèle ne sert pas à représenter directement le système cible mais d'abord à créer et matérialiser un lieu commun de concertation entre des parties prenantes ayant eu au départ des intérêts de connaissance divergents : l'intérêt commun d'ordre supérieur existe à terme, mais il devient progressivement celui de s'entendre sur les questions minimales et cette fois-ci véritablement partagées à poser au modèle de représentation à venir. Les travaux d'épistémologie inspirée de la sociologie des sciences et des *Sciences studies* ont préférentiellement mis en évidence ces types de modélisation, notamment en ce qui concerne les questions collectives pluripartites de portée socio-environnementale (pluies acides, climat, changement global, etc.).
- 18) Faciliter *la co-construction de représentations de systèmes complexes et mixtes* (mêlant physique, biologie, humain et social) en vue d'une gestion concertée et non centralisée ni *top-down*²⁰. La *modélisation d'accompagnement* permet que les acteurs modélisés, même et surtout les acteurs non scientifiques (p. ex. : agriculteurs et pasteurs sahéliens), participent activement à la formulation du modèle censé ensuite les aider à les rendre maître de la gestion du système auquel ils appartiennent ou, à tout le moins, plus conscients des mécanismes qui y interviennent.

¹⁸ Voir Michel Soustelle, *Modélisation macroscopique des transformations physico-chimiques*, Paris, Masson, 1990.

¹⁹ Peter Galison, *Image and logic*, 1997, *op. cit.*

²⁰ D'où le fait que ce type de pratique de modélisation a aujourd'hui recours préférentiellement aux approches de modélisation informatique par agents déconcentrés, non hiérarchisés et non par variables agrégatives. Voir ici la contribution de Raphaël Duboz et Jean-Pierre Müller.

I.2.5 Faciliter la décision et l'action

Enfin, produire un modèle peut consister parfois à ne rechercher ni une représentation simplifiée ou analogique ni un terrain d'entente ou de croisement des connaissances ni même seulement des questions communes à se poser sur le système cible. Il peut consister simplement à faciliter un type de réponse en termes d'*action optimale* concernant ce système. La réponse recherchée n'a pas à être articulée en une représentation, une conceptualisation ou un discours, mais elle doit se proposer simplement sous la forme d'un commandement à une action, en général urgente.

- 19) Faciliter l'intervention sur un système en facilitant la *détermination d'une décision ou action collective*. Dans cette modélisation de l'urgence, le modèle repose alors sur des heuristiques éprouvées et approuvées socialement de manière inductive en faisant le minimum d'hypothèses jugées irréalistes. On est contraint de recourir toutefois à des probabilités *a priori* (non théoriquement ni complètement vérifiées) dans des modèles de gestion de risques par exemple. En général, le système est fortement hétérogène - il mêle des dimensions tout à la fois biologiques, économiques et sociologique par exemple - et demande une intervention rapide des pouvoirs publics : c'est le cas des modèles de gestion de crise par exemple (accident industriel, pandémie, intoxication massive, etc.).
- 20) Faciliter une *décision économique individuelle ou à intérêt privé*. Là aussi l'urgence est de décider : va-t-on vendre ou acheter ? Cela face à d'autres intérêts privés ou face à l'intérêt collectif. Les modèles de produits financiers dérivés reposent par exemple souvent sur des hypothèses fausses mais utiles (par exemple l'hypothèse de compensation collective des décisions individuelles), hypothèses qui permettent de faire tourner des modèles mathématiques calculables donc relativement simples et connus, de faire des prédictions de valorisation et ainsi de prendre rapidement des décisions d'achat ou de vente. Mais ce type de pratique modélisatrice repose sur un cas de sophisme pragmatique : on fait l'hypothèse modélistique qui ne représente pas la réalité mais permet le calcul²¹. Par ailleurs, dans cette sous-partie du monde social essentiellement fondée sur des représentations, en temps normal, *i.e.* hors crise de confiance dans le modèle, le modèle se trouve être auto-réalisateur du fait même de la confiance que l'on a en lui²². Pendant ces périodes, le réel modélisé semble donc tragiquement, car en réalité faussement, corroborer l'hypothèse pragmatique du modèle qui n'est là que parce qu'elle a simplement pour vertu de rendre le modèle possible (car calculable avec les moyens de l'époque). C'est pourquoi, régulièrement en fait, le modèle

²¹ Sur ce type de sophisme, voir Laurence Bouquiaux, Bruno Leclercq, *Logique formelle et argumentation*, Bruxelles, De Boeck, 2009, p. 148. Une généralisation hâtive consisterait à penser que ce type de sophisme est inévitable dans toute pratique de modélisation et donc que tout modèle est à concevoir à l'image d'un modèle mathématique de produits financiers dérivés : faux, manipulateur et conçu pour disposer d'une solution de *pricing* calculable avec les moyens du bord les moins chers. La dilution de l'épistémologie des modèles dans une sociologie des modèles naïve car unilatérale en serait la conséquence inévitable : ce serait négliger la réelle différence des fonctions épistémiques entre modèles. La sociologie n'est fort heureusement pas condamnée à ce format là. C'est le cas lorsqu'elle reconnaît qu'elle a toujours quelque chose à apprendre de l'épistémologie, à condition toutefois que l'épistémologie ne soit pas elle non plus unilatérale et qu'elle aussi cherche à affiner ses analyses, notamment au contact de la diversité de la science en train de se faire.

²² Parmi de nombreux autres articles confirmant cette analyse, on peut se référer notamment à celui de Donald A. MacKenzie : "Models of Markets: Finance theory and the historical sociology of arbitrage", *Revue d'Histoire des Sciences*, Tome 57, vol. 2, pp. 407-431 http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/rhs_0151-4105_2004_num_57_2_2218.

devient auto-réfutant : c'est lorsque ce modèle de décision se révèle pour ce qu'il est. On s'en étonne uniquement si, à la longue, on a confondu cette fonction 20 avec la fonction 7, 8 ou 9.

I.3. Natures des modèles

Pour assurer toutes ces fonctions, les modèles peuvent être de différentes natures. Leur substrat peut d'abord être matériel ou même imagé au sens où il peut consister plus largement en des « images mentales » au sens de Hertz et Boltzmann. De tels modèles assurent alors préférentiellement les fonctions 1 à 5. Mais en réalité, les contraintes sont beaucoup plus souples. Certains modèles à substrat matériel ou imagé peuvent être traités comme de véritables modèles symboliques dans la mesure où leurs éléments peuvent être traités comme formels : les dés qu'utilisent matériellement le généticien P.H. Leslie en 1945 pour calculer des lois de probabilités se trouvent être accidentellement matériels mais servir essentiellement à la construction d'un modèle formel par tirage de nombres aléatoires.

Les acteurs d'un modèle d'accompagnement sont des individus humains réels qui ont un rôle finalement formel dans le système multi-agents qui cherche à représenter informatiquement leurs identités, leurs règles de comportement et leurs stratégies d'acteurs. Un modèle analogique électrique peut d'autre part servir de calculateur approché : ainsi en est-il de l'analyseur différentiel de Vanevar Bush qui a un temps été le rival des computers²³ ou calculateurs digitaux avant d'être supplantés par eux²⁴. On peut concevoir enfin la computation qui se produit dans un ordinateur comme analogue à un calcul logique ou bien encore comme directement analogue à ce qui se produit dans un système physique à états discrets. L'ordinateur lui-même peut être conçu soit comme un modèle physique, soit comme un modèle symbolique.

De façon générale, toutefois, aujourd'hui et comme cela se vérifie dans la plupart des chapitres que nous allons lire, le terme de modèle dénote seulement une *équation mathématique* ou, plus généralement, un *système d'équations*. Cette équation peut faire fond sur une théorie analytique, algébrique, logique ou encore de mathématique discrète (géométrie discrète, analyse combinatoire, théorie des processus de ramification, etc.). Ces différences sont jugées tantôt mineures, tantôt fondamentales selon les auteurs, scientifiques ou épistémologues qui réfléchissent sur le statut des modèles et des simulations²⁵.

²³ Le plus souvent, ici, nous préférons le terme de computer à celui, daté, d'ordinateur car il est plus générique. Il est le seul qui rende compte de ce que fait le plus généralement un « ordinateur » qui n'est pas qu'une machine à mettre en ordre de l'information contrairement à ce que certains pensaient, notamment en France, dans les années 1960. D'ailleurs, la langue française est aujourd'hui obligée d'accepter – en contrebande – la réintroduction de ce terme, avec ce qu'elle appelle les sciences computationnelles, même si on peut encore faire des contorsions en disant que « computationnel » n'implique pas ici forcément le recours à une machine, etc. Simplifions les choses : un ordinateur est avant tout, et plus largement, un computer, une machine à computations. De surcroît, son origine est quasi-exclusivement anglo-saxonne. L'essor de ses usages prioritairement simulateurs et computationnels le montrent à l'envi aujourd'hui alors que dans les années 60 on avait encore des raisons (accidentelles) de le voir seulement comme une machine à calculer ou comme une machine à traiter de l'information. Il n'y a donc vraiment plus de raisons de rebaptiser cet objet dans notre langue, sauf pour parler encore de ses usages particuliers et dérivés en technologies de l'information et de la communication, d'où dérive d'ailleurs le terme *informatics* que les anglo-saxons nous ont effectivement empruntés, mais justement exclusivement lorsqu'il s'agit pour eux de désigner le recours au computer dans des contextes communicationnels et d'analyse de données.

²⁴ Pour des *raisons méthodologiques* rarement rappelées mais que von Neumann a nettement anticipées et expliquées dans sa *Théorie générale et logique des automates* (1948), trad. fr. *Théorie générale et logique des automates*, Seyssel, Champ Vallon, 1996 : quel que soit le progrès des technologies de construction des uns et des autres, un calculateur numérique (*i.e.* à états discrets) permettra un contrôle des erreurs de calcul de plus en plus préférable à celui que permettra un calculateur analogique qui lui sera contemporain. Le computer sera donc tôt ou tard un meilleur calculateur. Pour l'analyse de cet argument de von Neumann, voir Varenne, *Qu'est-ce que l'informatique ?*, Paris, Vrin, 2009, pp. 69-94. Pour expliquer cette victoire actuelle des *computers* sur les calculateurs analogiques, il n'est donc nullement nécessaire d'aller jusqu'à convoquer l'interprétation physique de la Thèse de Church.

²⁵ Pour notre part, nous pensons que l'on doit donner une grande importance à ces différences de nature des théories mathématiques et donc des lieux d'expression des équations. C'est bien d'ailleurs ce qui nous a permis d'interpréter les successions de phases de démathématisation et de remathématisation dans l'histoire des modèles de croissance de plantes. Voir Varenne, 2007, *op. cit.* et *Formaliser le vivant : lois, théories, modèles ?*, Paris, Hermann, 2010. Voir également Varenne, *infra* ainsi que le chapitre de Marc Jaeger et Philippe de Reffye, *infra*.

Que retenir de ces remarques ? Première point : Le substrat ne détermine pas univoquement la fonction. C'est le modélisateur qui détermine ce qui dans la nature du modèle servira à assurer la fonction qu'il en attend. Pourtant, tout n'est pas purement relatif à la décision souveraine du modélisateur : certains substrats ou supports (matériels ou symboliques) facilitent objectivement et de manière parfois inédite (indiquant une rupture) l'essor de telle ou telle fonction dans telle ou telle circonstance historique comme au vu de l'état des instrumentalités disponibles. Un relativisme excessif ici ne nous paraît donc pas raisonnable, en tout cas si on le pense comme fondé uniquement sur la décision solitaire - et hors contexte - du modélisateur. C'est précisément le cas exemplaire du *computer* : il facilite objectivement en l'*accéléralnt* et en la *diversifiant* la fonction de computation sur des choses qui peuvent être considérées tantôt comme des nombres, tantôt comme de l'information, tantôt plus largement encore - ainsi qu'on le redécouvre aujourd'hui dans les sciences computationnelles - comme des symboles discrets dénotant des entités ou des propriétés réelles ou fictives. Second point : Même si sa fonction générale est de faciliter une médiation, la plus ou moins grande complexité du modèle dépend chaque fois du ou des quelques types de médiation qu'on lui demande de faciliter. Un modèle n'a donc pas à être simple en lui-même ni sous tous rapports. Sa propriété de simplifier n'impose nullement qu'il soit simple à tous égards. C'est faute d'avoir pris en compte la réelle multiplicité de leurs fonctions de médiation ainsi que les nettes différences de nature entre ces fonctions que l'on a dit et répété à l'excès que tous les modèles doivent être simples. Pourtant quel biologiste soutiendrait qu'un modèle expérimental comme un porc ou un chimpanzé (modèle de l'homme pour l'expérimentation de greffe, de médicament...) est nettement plus simple qu'un homme ? De même, il faut s'habituer à penser qu'un modèle de simulation à multiples sous-modèles imbriqués ne peut plus guère être dit simple, comme pouvait certes encore apparaître une équation ou un système d'équations mathématiques homogènes.

I.4. Principes mis en œuvre par les modèles : analogie, compression d'informations, dénotation, exemplification

Si l'on privilégie la fonction de représentation des modèles - qui ne concerne en fait strictement que les fonctions 1, 2, 3, 5, 7, 8, 9, 10 et 12 sur les vingt fonctions répertoriées - , on a tendance à dire que tout modèle repose sur une analogie. Ainsi, ce qui autoriserait un modèle à assurer la fonction qu'on en attend, quelle qu'elle soit, reposerait sur ce principe de l'analogie. Il est incontestable que cette identité ou similitude formelle de rapports internes - internes d'une part au modèle et d'autre part au système cible représenté - est une des raisons majeures qui fondent l'efficacité et la fiabilité de la plupart des pratiques de modélisation. La notion d'« analogie » à laquelle on adjoint parfois celles de « métaphore » puis de « fiction »²⁶ appartient originellement au domaine de la rhétorique : en suivant Max Black ou Mary Hesse puis les théoriciens des fictions, cela à partir du nominalisme spécifiquement benthamien, il est alors possible de penser le principe de fonctionnement de presque tous les modèles en se référant au seul domaine linguistique et à sa régulation rhétorique large, mais toujours essentiellement linguistique donc. Ces analyses sont instructives à certains égards et prêtent à

²⁶ Récemment, cette thèse a donné lieu à un débat fourni entre philosophes. Voir Anouk Barberousse, Pascal Ludwig, « Les modèles comme fictions », *Philosophie*, n°68, décembre 2000, pp. 16-43 ; Anouk Barberousse, Pascal Ludwig, "Models as Fictions", in Mauricio Suárez (ed.), *Fictions in Science. Philosophical Essays in Modeling and Idealizations*, London, Routledge, 2009, pp. 56-73 <http://philpapers.org/rec/BARMAF-2> ; Ronald Giere, "Why Scientific Models should not be regarded as Works of Fiction", in Mauricio Suárez (ed.), *Fictions in Science : Philosophical Essays on Modeling and Idealization*, London, Routledge, 2009, chapitre 14 <http://www.routledge.com/books/details/9780415990356/> ; Peter Godfrey-Smith, "Models and Fictions in Science", *Philosophical Studies*, 103, 2009, p. 101-116 http://www.petergodfreysmith.com/PGS_ModelsFictions-09Final.pdf ; Arnon Levy, "Models, Fictions, and Realism: Two Packages", *Philosophy of Science*, 2012, 79 (5), pp. 738-748 <http://philpapers.org/rec/LEVME>. Dans ces travaux de philosophie à visée avant tout argumentative, et pour les besoins même de l'argumentation, la réelle diversité des fonctions des modèles scientifiques ne peut pas être prise en compte. Une exception demeure le travail de Anouk Barberousse et Pascal Ludwig (*op.cit.*, 2000, voir notamment p. 36) qui tend à reconnaître cette diversité. Ce travail présente également l'intérêt de citer Goodman dans ce contexte, mais sans aller toutefois jusqu'à utiliser la richesse de sa théorie des symboles.

des rapprochements très intéressants. Mais il nous semble que cette « métaphore de la métaphore »²⁷ peut aujourd'hui se révéler réductrice devant les nouvelles pratiques de modélisation et de simulation computationnelles, comme devant les pratiques de co-construction, de concertation par modèles ou de modélisation d'accompagnement.

Un certain nombre de biométriciens parmi ceux qui expriment une épistémologie appliquée de type inductiviste ou pragmatique pensent ainsi que ce n'est pas tant la reproduction simplifiée et analogique que la compression et la présentation sélective de l'information qui importe dans un modèle. Cette analyse des données procédant à leur compression et à la mise au jour de leurs *facteurs* - par analyse factorielle ou par analyse en composantes principales - est rendue possible par les modèles statistiques utilisés en analyse multivariée, notamment grâce à la technique dite de réduction de variance. Or, selon certains biométriciens, une telle compression d'informations ne vise pas un redoublement du système cible par une représentation écran. Ce qui serait imposer que le modèle assure la fonction 5. Mais un tel modèle vise pour eux seulement une présentation condensée des données expérimentales. La modélisation ne ferait par là que prolonger la méthode expérimentale d'interrogation orientée (*via* des hypothèses) et instrumentée (*via* des instruments, ici symboliques) de la nature, méthode classique depuis au moins Claude Bernard : de ce point de vue, c'est donc la fonction 4 qui est jugée essentiellement à l'œuvre²⁸.

Il est donc possible de concevoir les modèles sans avoir pour cela nécessairement à acclimater des concepts issus du seul domaine linguistique, que ce soit dans ses aspects sémantique, pragmatique ou rhétorique. Si l'on s'installe directement au niveau d'une théorie générale des symboles comme celle de Nelson Goodman²⁹, par exemple, comme nous le proposons, il est possible de concevoir plus largement les modèles mais aussi et surtout les simulations - nous y reviendrons - comme des dispositifs de symbolisation dont les structures internes n'ont pas prioritairement à s'insérer dans des systèmes de symboles à fonctionnement exclusivement linguistique³⁰ et donc visant avant tout soit l'analogie soit le récit. Ce qui permet déjà de soupçonner que la validation des modèles ne procèdera pas toujours prioritairement de la mise au jour d'une structure d'analogie au sein d'un même langage ou entre deux langages. En effet, certains *modèles de simulation* fonctionnent prioritairement sur la base d'une mise en évidence de *systèmes de dénotation* différenciée, multi-aspectuelle ou multi-échelle³¹. C'est alors la fonction de référence dite de dénotation - comme on dit qu'un portrait dénote la personne portraiturée - qui prime dans ce cas. Un nom ou un label mais aussi un portrait ou un dessin dénotent autre chose qu'eux : un modèle peut alors être une carte, un dessin, une scène numérisée, bref une structure sémiotique plus riche, quoique certes plus faiblement combinable, qu'une performance linguistique comme un énoncé, un discours ou un récit³².

Davantage, la théorie générale des symboles de Goodman permet d'introduire, à côté de la relation de dénotation, la relation de référence dite d'*exemplification*. Une propriété peut exemplifier un nom ou un dessin qui la dénote. Plus largement, un objet matériel peut instancier un modèle formel et par là l'exemplifier. À ce titre, on peut dire que l'objet matériel qui instancie un modèle formel le

²⁷ Comme nous l'avions qualifiée dans Franck Varenne, *Les notions de métaphore et d'analogie dans les épistémologies des modèles et des simulations*, Paris, Petra, 2006, p. 38.

²⁸ C'est la thèse vigoureusement soutenue par Jean-Marie Legay depuis les années 1960 et notamment encore dans *L'expérience et le modèle*, Paris, INRA éditions, 1997. Au sujet de l'apport méthodologique et épistémologique important de Jean-Marie Legay en matière de modélisation, cela au-delà même de la biométrie, son domaine d'origine, voir *infra* le chapitre d'Alain Pavé qui lui est consacré.

²⁹ Nelson Goodman, *Languages of Art: An Approach to a Theory of Symbols*, Indianapolis, Bobbs-Merrill, 1st édition: 1968.

³⁰ Un langage est un type très particulier de système de symboles. Voir à ce sujet *ibid.*, notamment p. 40.

³¹ Voir Franck Varenne, "Chains of Reference in Computer Simulations" (à paraître), <http://philpapers.org/rec/VARCOR>

³² Voir à ce sujet Denis Phan, Franck Varenne, "Agent-Based Models and Simulations in Economics and Social Sciences: from conceptual exploration to distinct ways of experimenting", *Journal of the Artificial Societies and Social Simulation (JASSS)*, 13(1), 2010, <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/13/1/5.html> ; Franck Varenne, "Framework for Models & Simulations with Agents in regard to Agent Simulations in Social Sciences: Emulation and Simulation", in A. Muzy, D. Hill & B. Zeigler (eds), *Activity-Based Modeling and Simulation*, Clermont-Ferrand, Presses Universitaires Blaise Pascal, pp. 53-84, http://www.msh-clermont.fr/IMG/pdf/04-Varenne_53-84.pdf

simule et donc le modélise aussi en ce sens-là. Mais il est temps justement d'en venir à la notion de simulation.

II. Les simulations

II.1. La simulation comme type de modèle

Traditionnellement, la simulation a été conçue comme un type particulier de modèle. On la range encore souvent parmi les modèles qui visent à reproduire les performances observables du système cible sans reproduire les interactions causales supposées à l'œuvre dans ce système³³. La simulation serait un modèle phénoménologique de type 7 à la manière dont nous l'avons présenté plus haut. De fait, une éruption volcanique modélisée par une réaction chimique sur un coin de table à des fins pédagogiques (au moins pour faciliter la visualisation du processus général *puis* des phénomènes mécaniques d'écoulements subséquents) est souvent dite « simulation » plutôt que modèle : on veut dire par là qu'une véritable éruption volcanique n'a pas en réalité pour principales causes des causes chimiques, mais plutôt un ensemble de causes physiques de nature majoritairement mécanique et thermodynamique. Ainsi, on peut souvent considérer qu'une simulation est un modèle phénoménologique à visée de prédiction ou même seulement d'apprentissage en termes de cognition pratique (p. ex. : simulateur de conduite, de vol, etc.). Les simulations grandeur nature mettant en œuvre des êtres humains pour la formation en management, par exemple, ou pour le test de scénarios de gestion de crise (accidents, tremblements de terre, etc.) remplacent également les motivations réelles des composants (les acteurs) par des motivations - donc des mécanismes - d'une tout autre nature (financière, etc.) mais censées avoir les mêmes effets visibles et mesurables.

II. 2. La simulation comme calcul de modèle

Depuis l'émergence de l'ordinateur ou computer, on dit que l'on simule un modèle mathématique lorsque l'on fait faire à l'ordinateur une résolution numérique approchée du modèle en question. Il faut observer que le sens premier du terme de simulation n'est pas abandonné même dans ce cadre-là : le *simulateur* qu'implémente le programme a bien pour fonction d'imiter pas-à-pas le comportement local du modèle mathématique qu'on ne sait pas sinon résoudre de manière analytique donc abrégée et par théorèmes. Ce qui est imité ici dans ses seules performances visibles et de proche en proche, c'est à chaque fois le micro-comportement des variables et des processus du modèle mathématique échantillonné. Un calcul numérique de modèle mathématique peut donc bien être conçu comme une simulation de modèle mathématique.

Si on considère que le modèle prend en compte le caractère dynamique du système cible, on peut ajouter qu'une simulation consiste, comme on le lit souvent, à *plonger le modèle dans le temps*, c'est-à-dire à faire que sa computation approchée soit en même temps la computation des étapes successives du modèle censées dénoter des étapes elles aussi successives du système cible. En réalité, certaines simulations de modèle ne nécessitent nullement d'être interprétées comme des plongées du modèle dans le temps : certaines simulations permettent par exemple, au moyen du tirage de nombres

³³ On publie encore aujourd'hui des ouvrages visant à présenter les techniques de simulation dans toute leur généralité mais qui ne présentent en fait que les seules techniques de simulations Monte-Carlo issues des travaux de Ulam et Metropolis et leurs dérivés : ces approches par modèles de simulation probabilistes (issues notamment aussi des développements ultérieurs de la recherche opérationnelle) peuvent en effet être considérées comme une sorte de technique de simulation générale visant à reproduire la forme des phénomènes plutôt que les interactions causales qui leur ont donné naissance. Historiquement, cela peut se comprendre : elles ont été parmi les premières à se nommer « techniques de simulation » dans le cadre d'un usage intensif du computer.

pseudo-aléatoire, de reconstruire une loi probabiliste qui servira ensuite de forme simulée prise en bloc (voir les techniques Monte Carlo et leurs dérivées). Elles n'ont pas besoin de s'adosser au temps pas plus qu'à sa flèche, réelle, virtuelle ou simulée. Pourtant, il s'agit bien là aussi de simulations de modèles. En fait, quand on dit que la simulation permet au modèle d'être plongé dans le temps, cela signifie surtout qu'on considère subjectivement - parfois à tort parfois à raison - une autre dimension de dénotation que semble avoir souvent la simulation cette fois-ci eu égard directement au système cible (et non au modèle) : sa dimension temporelle. Mais c'est là confondre des types de dénotation comme aussi des types de temps radicalement différents³⁴.

Les rapports entre modèle et simulation se compliquent encore à partir du moment où l'on s'aperçoit que les scientifiques parlent tout à la fois de « simulation de modèle » et de « modèle de simulation ». Par moments, on a l'impression qu'ils sont tentés d'écrire dans leurs articles qu'ils ont « simulé le modèle de simulation ». Qu'est-ce que cela peut bien signifier ? En réalité par modèle de simulation, ils entendent souvent désigner un modèle qui a pour fonction prioritaire de simuler - au sens de dénoter directement - le système cible. Mais la confusion demeure sur cette expression de « modèle de simulation » qui peut en fait recevoir une autre acception encore. Nous y reviendrons donc plus bas.

II.3. Une caractérisation générale des simulations

Pour clarifier les termes de la réflexion, l'objectif de ce paragraphe est de proposer une caractérisation générale de ce en quoi consiste pour nous aujourd'hui une simulation, cela de manière à comprendre que ce terme puisse tour à tour dénoter aussi bien un modèle qui imite des performances visibles qu'un calcul de modèle formel.

En fait, contrairement aux modèles en général, une simulation est caractérisée non pas tant par l'unité d'une fonction cognitive qu'elle assurerait toujours sous une forme ou sous une autre³⁵ que par son fonctionnement interne, fonctionnement qui, bien sûr, mais seulement secondairement se trouve avoir aussi des conséquences sur sa ou ses fonctions cognitives. Une simulation nous paraît ainsi devoir être prioritairement caractérisée par ce qu'elle est - ou fait - de manière interne plutôt que par ce qu'elle fait au sens d'une fonction cognitive quelconque qu'elle assurerait toujours et qu'on en attendrait prioritairement de l'extérieur : à ce titre, nous proposons de dire qu'elle est avant tout un traitement spécifique sur des symboles³⁶ et qui prend toujours la forme d'au moins deux phases distinctes.

- 1) Une *phase opératoire* pendant laquelle des opérations de *computation* - i.e. des opérations pas à pas sur des symboles discrets - se produisent entre des symboles supposés chacun dénoter ou exemplifier des entités ou des propriétés ou des processus réels ou fictifs.

³⁴ Il serait trop long de rentrer dans le détail ici. Notons simplement que c'est la raison pour laquelle nous avons introduit récemment le terme de *simulat* pour dénoter le résultat d'une simulation et pour le distinguer du processus même de simulation. Voir Franck Varenne, « La reconstruction phénoménologique par simulation : vers une épaisseur du *simulat* », in Daniel Parrochia, Valentina Tironi (dir.), *Formes, systèmes et milieux techniques*, Lyon, Edition Jacques André, 2012, pp. 107-123.

³⁵ C'est pourquoi certains auteurs ont été jusqu'à affirmer qu'une simulation n'est pas un modèle. Voir par exemple John Simpson, "Simulations are not models," in *Models and Simulations*, Conference 1, 2006, conférence non publiée ; accessible sur <http://philsci-archive.pitt.edu/2767/1/SimsAreNotModelsRD7.pdf>

³⁶ En ce sens, toute simulation participe bien à une *stratégie globale de symbolisation* (voir notre chapitre *infra*). Mais cette stratégie n'est pas toujours uniforme, c'est-à-dire portée par un *seul mode* de symbolisation : c'est pourquoi on ne peut pas en réalité définir généralement la simulation à partir de telle ou telle mode particulier de symbolisation : que ce soit le mode de représentation iconique, de représentation analogique, de dénotation ou encore d'exemplification. Une simulation n'est par exemple pas toujours un modèle iconique, i.e. à ressemblance sensible, loin s'en faut.

- 2) Une phase d'*observation*, c'est-à-dire encore de visualisation, d'évaluation, de détection, de mesure, consistant en tout type de traitement secondaire (reconnaissance de formes, expérience virtuelle, etc.) qui conduit à considérer les produits des opérations de la phase précédente comme d'autres types de symboles à part entière appartenant à un autre niveau dénotatif³⁷ ou même à un certain niveau symbolique d'une autre hiérarchie dénotative que celle à laquelle appartiennent les symboles élémentaires de l'étape opératoire³⁸.

Ce qui est important dans une simulation, c'est donc le *changement de niveau de symboles*, soit à l'intérieur d'une même hiérarchie dénotative, soit entre deux hiérarchies dénotatives distinctes. On pourrait dire que cette caractérisation générale de la simulation que nous proposons s'apparente à la caractérisation que Stéphanie Forrest donne de la *computation émergente*, elle-même inspirée d'une analyse antérieure de Douglas R. Hofstadter³⁹. Forrest écrit en effet :

Les réquisits de la computation émergente sont assez similaires à ceux proposés par Hofstadter dans son papier sur la sous-cognition⁴⁰. Il souligne que l'information qui est absente à un niveau plus bas peut exister au niveau des activités collectives. C'est l'essence des constituants suivants de la computation émergente :

- i) Une collection d'agents, chacun suivant des instructions explicites ;
- ii) Des interactions entre les agents (en conformité avec les instructions), qui forme des *patterns* implicites globaux au niveau macroscopique, i.e. des épiphénomènes ;
- iii) Une interprétation naturelle des épiphénomènes comme computations.⁴¹

Plus loin, elle précise qu'« implicite » signifie que ces patterns ne sont définis nulle part explicitement⁴². Et elle ajoute : « Le point important est que les instructions explicites se trouvent à un niveau différent (plus bas) que le phénomène d'intérêt »⁴³. En réalité, contrairement à ce que Stéphanie Forrest semble supposer, cette caractérisation n'assure pas nécessairement que le pattern obtenu présente des propriétés effectivement émergentes au sens fort et pas seulement résultantes⁴⁴. Dans la suite de son article, sa caractérisation de l'émergence demeure d'ailleurs peu précise, comme dans beaucoup de travaux d'autres auteurs qui portent sur ce concept difficile à cerner⁴⁵. On ne peut donc

³⁷ Ce que Goodman appelle un *niveau* dans une « hiérarchie dénotative », in Nelson Goodman, « Routes of reference », *Critical Inquiry*, 8(1), 1981, pp. 121-132. Les précisions dans ce contexte sont apportées par l'article suivant : Denis Phan, Franck Varenne, « Agent-Based Models and Simulations in Economics and Social Sciences: from conceptual exploration to distinct ways of experimenting », *Journal of the Artificial Societies and Social Simulation (JASSS)*, 13(1), 2010, <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/13/1/5.html>

³⁸ Des précisions se trouvent dans Varenne, « Framework for Models & Simulations with Agents in regard to Agent Simulations in Social Sciences: Emulation and Simulation », in A. Muzy, D. Hill & B. Zeigler (eds), *Activity-Based Modeling and Simulation*, Clermont-Ferrand, Presses Universitaires Blaise Pascal, pp. 53-84, http://www.msh-clermont.fr/IMG/pdf/04-Varenne_53-84_.pdf. Remarquons qu'une simulation sur ordinateur effectuée la première étape sur machine digitale, pas forcément la seconde.

³⁹ Voir Franck Varenne, *Du modèle à la simulation informatique*, Paris, Vrin, 2007, pp. 186-187. Voir aussi notre article d'abord paru en 2008 dans *Matière Première*, n°3, février 2008, 153-180 et réimprimé ici-même *infra* : « Modèles et simulations : pluriformaliser, simuler, remathématiser ».

⁴⁰ Douglas R. Hofstadter, *Artificial Intelligence : subcognition as computation*. Technical Report 132, Indian University, Bloomington, IN, 1982 <http://www.cs.indiana.edu/cgi-bin/techreports/TRNNN.cgi?trnum=TR132>

⁴¹ Stéphanie Forrest, « Emergent computation - Introduction to the Proceedings of the Ninth annual CNLS Conference », in Stéphanie Forrest (ed.), *Emergent Computation*, Cambridge, Mass., MIT Press, 1991, p. 2. Notre traduction.

⁴² Voir aussi le commentaire de Guillaume Chérel sur ce passage précis de Forrest in Guillaume Chérel, *Détection et abstraction de l'émergence dans des simulations de systèmes complexes : application aux écosystèmes de savane*, Thèse de doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie et de l'Université de Nangui Abrogoua, 2013, p. 35 : « Implicite car défini nulle part explicitement : il n'existe aucune adresse où lire le résultat. La lecture nécessite une interprétation du motif par un observateur. On a souvent recours à la visualisation (représentation graphique des données) pour cette étape. »

⁴³ Forrest, *op. cit.*, p. 2.

⁴⁴ Pour une discussion générale sur cette différence, voir Jaegwon Kim, *Trois essais sur l'émergence*, Paris, Ithaque, pp. 8-12. En fait, dans ce contexte computationnel, il s'agirait bien sûr seulement d'*émergence faible* au sens de Bedau et non de propriétés absolument non résultantes. Voir Mark Alan Bedau, « Weak Emergence » in J. Tomberlin (ed.), *Philosophical Perspectives*, « Mind, Causation and World », 1997, vol. 11, pp. 375-399, Malden, MA, Blackwell <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/0029-4624.31.s11.17/abstract>

⁴⁵ Voir ici même, *infra*, l'article clarificateur de Philippe Huneman sur ce concept d'émergence.

lui en faire grief. Mais c'est la raison pour laquelle, à notre avis, la liste de ses réquisits (les deux premiers en fait) est intéressante pour nous - ils rejoignent les nôtres - mais pas d'abord pour caractériser l'émergence en contexte computationnel⁴⁶. Elle vaut bien davantage et plus utilement pour caractériser *tout type de simulation*. En effet, une simulation comme telle n'a pas nécessairement à être considérée également ni toujours comme promotrice d'émergence⁴⁷, en quelque sens que l'on voudra bien prendre ce dernier terme. Cette caractérisation en revanche est utile pour distinguer tout usage simulateur du computer d'un usage de ce même computer comme *moteur d'inférence* ou *moteur de calcul formel*. Il est en effet essentiel ici, pour notre objectif de clarification épistémologique, de distinguer avant tout une simulation d'un calcul formel : toute computation effectuée sur un computer n'a pas nécessairement à être considérée seulement comme une simulation, même si on peut toujours *aussi* la percevoir comme cela. En effet, s'il se trouve que les séquences de l'exécution du programme *émulent* parfaitement la séquence des étapes d'un calcul formel explicite par ailleurs, ou au moins pratiquement explicitable⁴⁸, on peut dire que l'ordinateur procède littéralement à un calcul formel et non à une simulation⁴⁹. Il est, dans ce cas, une machine logique et non prioritairement une machine à simulation. Nous disons « pratiquement explicitable » pour évoquer le fait que les théories mathématiques de haut niveau qui soutiennent conceptuellement par ailleurs les règles des calculs formels et sur lesquelles reposent à leur tour les principes des actuels logiciels de calcul formel peuvent expliciter complètement le calcul⁵⁰, mais aussi pour rejeter la conception moniste logique selon laquelle toute computation sur computer, du moment qu'elle est *en principe* réductible à un calcul formel au niveau de la microprogrammation en termes de calculs des prédicats (par exemple) le serait toujours à la fois effectivement et pratiquement.

II.4. Trois types de simulations⁵¹

À partir de notre caractérisation générale de la simulation en deux points, on peut ensuite arriver à définir au moins trois types différents de simulation, suivant le type d'ancrage que privilégie la stratégie de symbolisation du procédé de simulation : 1) soit la simulation organise des rapports symboliques internes à une unique hiérarchie dénotationnelle préfixée, 2) soit elle organise des rapports de référence externes entre symboles ou entre symboles et entités appartenant d'une part à la

⁴⁶ Voir toutefois l'usage fécond qu'en fera Jean-Pierre Müller, mais justement surtout grâce à sa reprise du réquisit n°3 de Forrest, réquisit certes modifié et réinterprété, pour caractériser différents types d'émergence - en l'occurrence forte ou faible - en fonction de l'observateur et de sa place *dans* ou *hors* du système cible in Jean-Pierre Müller, "Emergence of Collective Behaviour and Problem Solving", *Emergent Societies in the Agents World IV*, Lecture Notes in Computer Science, Volume 3071, Springer, 2004, pp 1-20 http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-540-25946-6_1.

⁴⁷ On peut concevoir un programme de simulation qui remplit pas à pas (par tirages pseudo-aléatoires de la position du prochain pixel) une zone d'écran en rouge à partir d'un unique symbole de pixel rouge : la propriété finale de l'écran résultera additivement - donc de manière prévisible car abrégée mathématiquement pour un esprit humain - de la propriété du symbole élémentaire. Elle ne nous apparaîtra pas comme émergente, mais seulement comme résultante. Et pourtant elle sera le produit d'une simulation.

⁴⁸ Que l'on peut considérer comme subsistant et interagissant à un seul et unique niveau symbolique et donc comme un système de symbole de type « système formel » et par là de type linguistique. Car un *système formel* repose d'abord sur un langage (voir Goodman, 1968, *op. cit.*, p. 40) et tous les systèmes de symboles n'ont pas en ce sens vocation à être des systèmes formels.

⁴⁹ Sur cette différence importante, voir Varenne, "Chains of Reference in Computer Simulations" (à paraître), <http://philpapers.org/rec/VARCOR>, manuscrit auteur, p. 12.

⁵⁰ Ce qui signifie qu'elles existent avant et qu'elles rendent possible les principes et ensuite l'écriture même de ces logiciels qui les émuleront.

⁵¹ Dans Varenne, "Models and Simulations in the Historical Emergence of the Science of Complexity", in M.A. Aziz-Alaoui & C. Bertelle (eds), *From System Complexity to Emergent Properties*, New York, Springer, 2009, pp. 3-21 http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-642-02199-2_1, nous montrons que cette distinction entre trois types de simulations sur ordinateur permet de distinguer entre *trois types d'émergence faible* au sens de Bedau (1997, *op. cit.*), puisque selon lui, l'émergence faible se caractérise par le fait général que l'on doit recourir à la simulation. D'après ces distinctions, les *émergences computationnelles* seraient donc ici au moins de trois types différents. Or, ces types sont d'inégale valeur objective. Grâce à cette distinction, on voit mieux en tous les cas que la difficulté à procéder à une computation à la main et donc la nécessité de recourir à la simulation sur computer relèvent de raisons de natures diverses et donc pas toujours ni uniquement ou uniformément de problèmes logiques de calculabilité effective (même si ces problèmes sont divers en difficulté eux aussi : voir à ce sujet, une bonne synthèse sur les différents types de calcul et d'analyticité dans Gilles Dowek, *Les métamorphoses du calcul*, Paris, Le Pommier, 2007).

hiérarchie dénotationnelle du modèle de simulation et d'autre part aux différentes hiérarchies dénotationnelles du système cible, 3) soit elle organise simultanément les deux types de rapports symboliques (internes et externes) avec en plus la possibilité, pour le modèle de simulation, de disposer de plusieurs hiérarchies dénotationnelles internes. Ces distinctions présentées ici de manière abrupte et synthétique vont s'éclaircir et être explicitées dans la suite.

II.4.1. La simulation *dirigée par le modèle* ou *simulation numérique*

Dans ce type de simulation, c'est le modèle et son caractère mathématique qui sont privilégiés. La simulation est au service du modèle. Le modèle prend le plus souvent la forme d'une équation ou d'un système d'équations reliant des variables d'état du système cible. Ces variables sont discrétisées en éléments (par des méthodes d'éléments finis, de différences finies, de particules ou de cellules fictives⁵², etc.) et le traitement de la phase opératoire de la simulation correspond alors à la mise en œuvre pas à pas des interactions entre ces éléments. Comme l'emphase reste mise sur les variables dénotant des propriétés de niveau supérieur, les éléments du niveau inférieur sont souvent considérés comme fictifs, comme des artifices de calcul, c'est-à-dire comme ne symbolisant pas réellement des éléments identifiables dans un niveau inférieur du système cible. Ainsi en est-il des simulations numériques en mécanique des fluides, par exemple : les symboles d'éléments finis ne sont pas pris comme dénotant des composants réels subsistant à un niveau inférieur du système cible. En outre, dans ces simulations, la précision est le plus souvent théoriquement contrôlée et l'on sait donc de manière sûre qu'un tel calcul approché va converger du fait même de l'existence de certains théorèmes qui le montrent : en conséquence de cela, il est compréhensible que l'on y conçoive la simulation essentiellement comme un artifice de calcul au service du modèle. Certaines simulations numériques peuvent cependant parfois permettre de valider des calculs analytiques abrégés dont il se trouve après coup - i.e. sans qu'une démonstration mathématique ait d'abord pu le prouver - qu'ils résolvent le modèle, calculs que l'on tâchera ensuite de mettre en œuvre directement, en concurrence avec la simulation ou à sa place⁵³. De tels calculs analytiques explicites ne sont pas à confondre avec les théorèmes qui montrent par ailleurs que la simulation numérique convergera. Le plus souvent, on peut donc procéder avec sûreté à des simulations numériques de modèles pour lesquelles on dispose ou non de calculs analytiques abrégés⁵⁴.

Dans une telle simulation, même si leur fonction de référer est virtuelle (ce sont des *null labels* dirait Goodman), on doit pourtant dire que les symboles d'éléments finis ou de différences finies *exemplifient* les variables. Mais avec une telle simulation, on fait opérer au computer une stratégie de symbolisation principalement à l'intérieur d'une même hiérarchie dénotationnelle : éléments finis ou différences finies, d'une part, et variables agrégatives d'autre part, appartiennent en effet à la même hiérarchie dénotationnelle⁵⁵. C'est pour cela que l'on a l'impression qu'un traitement de simulation n'est, dans le cas de la simulation numérique, pas authentiquement une pratique de référence entre symboles et choses, d'où les articles montrant à juste raison de ce point de vue le caractère non empirique de la simulation. Pourtant, on peut aussi continuer à voir une simulation numérique comme un dispositif de computation par *exemplification* - certes fictive - de variables agrégées. Et ce procédé

⁵² Voir Stéphane Colombi, *infra*, section 4.1 : « L'objet d'une simulation est de résoudre numériquement les équations de la dynamique d'un système physique lorsque l'approche analytique n'est plus possible ». Au sujet des simulations numériques, voir aussi la section 2 du chapitre de Frédéric S. Masset. Notons toutefois que l'on peut également considérer, d'un certain point de vue, que les approches numériques par cellules fictives ou par échantillonnages d'équations au moyen de microparticules (comme il en est question dans ces chapitres sur l'astrophysique) se rapprochent aussi en partie des techniques de simulation par règles dont il sera question dans la deuxième catégorie. Malgré cela, toutefois, c'est bien toujours le modèle mathématique qui est antérieurement connu et qui doit être adapté ensuite à un traitement de simulation. En ce sens, de telles simulations restent essentiellement des simulations numériques.

⁵³ Sur cet usage de la simulation, voir Colombi, *infra*, section 4.2.

⁵⁴ Alors que, dans le cas des simulations à base de règles et à base d'agents dont il sera question plus bas, on a moins voire pas du tout de moyens de connaître *a priori* la convergence et la robustesse des résultats de simulation.

⁵⁵ *Ibid.*, p. 14.

d'exemplification est bien lui-même un procédé de symbolisation qui traite les exemples *comme* des choses, puisque comme des *null labels*. D'où peut aussi se comprendre l'argument de certains articles qui insistent au contraire sur le caractère également quasi-empirique de ces simulations⁵⁶.

II.4.2 La simulation *dirigée par des règles* ou *simulation algorithmique*

À la différence de la simulation numérique, une telle simulation ne part pas d'un modèle mathématique qu'il faudrait d'abord discrétiser. Elle part directement de symboles élémentaires ou de symboles de règles élémentaires qui dénotent d'une manière choisie des entités ou des propriétés du système cible. Son mode de symbolisation est donc principalement externaliste : les symboles sont choisis non plus parce qu'un théorème conseillerait de manière sûre de les employer pour exemplifier des variables d'états déjà mise en œuvre dans un modèle général mais de façon à référer directement à des entités ou propriétés du système cible, cela même de manière parfois quasi-iconique mais pas toujours⁵⁷. Ce mode de référer que l'on peut dire *externe* et *latéral* entre hiérarchies internes et hiérarchies externes est ce qui caractérise les simulations fondées principalement sur des règles. Les automates cellulaires par exemple sont généralement employés pour simuler des systèmes eux-mêmes spatialisés à fortes interactions locales. Les grammaires génératives (les L-systèmes par exemple) sont des systèmes de simulation à base de règles de réécriture de symboles qui prennent au sérieux la notion théorique de filiation par réécriture et la reproduise symbole par symbole.

II.4.3 La simulation *dirigée par des objets* ou *simulation informatique* ou encore *simulation à base d'ontologies*

Si le processus de simulation part non pas uniquement de symboles d'éléments ni de symboles de règles élémentaires dénotant des propriétés élémentaires du système mais d'une *objectification* préalable des entités qu'elle dénote et qu'elle se sert ensuite de cette objectification pour concevoir non pas une mais *plusieurs hiérarchies dénotationnelles internes* au modèle de simulation (diversité de hiérarchies que l'on peut uniquement dans certains cas standardisés appeler *ontologie*), alors la computation aura pour rôle d'organiser pas à pas les rapports référentiels internes mais aussi les rapports référentiels externes entre les hiérarchies dénotationnelles internes et les hiérarchies dénotationnelles externes.

Dit plus simplement : le concept informatique d'objet permet dans ce type de simulation que la computation formalise un lieu de rencontres et d'interactions réglées entre symboles, entre systèmes de symboles ainsi qu'entre niveaux de symboles. Ces symboles possèdent des fonctions référentielles hétérogènes car très diversement motivées : une simulation informatique peut ainsi mêler une simulation numérique et une simulation à base de règles. La gestion de leur lieu de rencontre et de calcul est donc particulièrement épineuse, d'où l'objectification. Il est à noter que l'objectification est ici de nature d'abord prioritairement méthodologique : elle n'a pas à être considérée comme imposant aussi un engagement ontologique particulier sur des objets réels corrélats des objets informatiques dans le monde réel. Malheureusement, de nombreux articles méthodologiques sur les approches agents en sciences sociales surtout ou même en biologie confondent encore ces deux niveaux d'appréhension des techniques de simulation : méthodologique et ontologique. Le rôle de l'épistémologie est ici,

⁵⁶ C'est pourquoi Hervé Wozniak est fondé à dire que simuler, même numériquement, est comme « expérimenter sur un modèle », *infra*, introduction.

⁵⁷ Voir plus bas, les exemples données dans le chapitre de Bernard Walliser, Sébastien Dutreuil, mais aussi dans ceux de Juliette Rouchier, Guillaume Deffuant et *al.* ou encore de Arnaud Banos et Léna Sanders. Certaines des simulations qu'ils évoquent entrent toutefois davantage dans la 3^{ème} catégorie.

autant que possible, d'enseigner le discernement et d'aider à mettre au jour ce genre de confusions d'origine d'ailleurs souvent elles-mêmes philosophiques. Toutefois, quand on a clairement conscience que l'objectification méthodologique n'impose pas en elle-même l'objectification ontologique, on peut tout de même délibérément traiter l'un simultanément avec l'autre cela tout simplement parce que les *validations croisées*⁵⁸ en sont plus aisées⁵⁹ et donc que la calibration ou la validation des modèles en sont facilitées : c'est, selon nous, la raison méthodologique majeure qui explique l'essor actuel des approches individus-centrés comme celles que présente notamment Olivier Gandrillon ou Hugues Berry et Guillaume Beslon, en biologie. Le chapitre de Jean-Pierre Mazat suffirait à lui seul à nous convaincre que lorsqu'il s'agit de prendre au sérieux la cellule et le métabolisme au niveau cellulaire lui-même, une des stratégies raisonnables, mais non la seule, consiste à essayer de construire un modèle théorique général d'un tel métabolisme, modèle qui résume et abrège des milliers d'interaction internes à la cellule : mais c'est un choix de point de vue et de niveau qui paiera si on dispose des moyens d'ancrer véritablement ces conceptualisations dans des données stabilisées. Dans cette perspective, le chapitre d'Edith Perrier sur la modélisation multi-échelles du système sol-eau propose des analyses comparatives des vertus et des limites des approches de modélisation plus ou moins individus-centrées : on y a une analyse comparée tour à tour des approches numériques, par cellules puis par réseaux. On y voit que l'approche à base d'individus présente des intérêts mais n'est pas bonne en soi ni toujours à rechercher : les alternatives méthodologiques doivent donc chaque fois être bien mesurées. Le chapitre également comparatif de Guillaume Costesèque montre bien aussi que la modélisation du trafic routier n'impose pas que la modélisation microscopique (où les véhicules sont individualisés) soit toujours la meilleure solution : là aussi, il faut avoir clairement à l'esprit la question préalable de modélisation, c'est-à-dire ce que l'on cherche à obtenir du modèle conformément à la caractérisation générale des modèles que nous avons rappelée plus haut.

C'est cette remarque sur l'importance de la possibilité de se livrer effectivement à des *validations croisées* qui permet d'ailleurs de bien comprendre aussi le propos de Denis Noble : son chapitre présente sept grands principes pour la modélisation des systèmes biologiques. Or, ce sont des principes d'ouverture et de refus de toute réintroduction d'une vision trop unilatéralement hiérarchisée ou réductionniste. Et pourtant Denis Noble et son équipe recourent de plus en plus eux-mêmes à l'approche individus centrée pour leurs modèles intégratifs du cœur et au-delà, du physiome. On ne comprend la cohérence entre ce discours méthodologique et cette pratique que si l'on admet qu'avec les approches individus-centrés, il s'agit de mettre en œuvre avant tout un individualisme véritablement méthodologique et non un individualisme ontologique qui ne dirait pas son nom. Ce que l'on observe en lisant ces chapitres sur les approches à base d'individus, c'est que, la plupart du temps, on cellularise, on individualise, on agentifie, on objectifie non d'abord pour donner une image plus réaliste du réel mais parce qu'on recherche une méthode permettant la co-calculabilité de théories ou de modèles non calculables de façon conjointe, que ce soit mathématiquement ou même par simulation seulement numérique.

Au sujet de ce type complexe de simulation, remarquons qu'il n'est pas rare qu'une simulation multi-niveaux traite des individus (animaux, hommes, etc.) à la fois comme des agents autonomes à

⁵⁸ Ou validation simultanée à de multiples échelles et sous de multiples aspects d'une simulation multi-échelles et/ou multi-aspects. Les voies de la référence des symboles en jeu dans de telle simulation sont multiples et elles permettent donc des ancrages multiples dans des données hétérogènes, à chaque niveau, données au sujet desquelles, et cela du fait même de leur hétérogénéité, il est de moins en moins probable qu'elles soient directement corrélées. Sur l'essor des techniques de validation croisée pour le traitement des simulations complexes, sur le fait qu'elle n'implique pas un engagement ontologique au sujet des corrélats des symboles de simulation et sur leurs liens avec l'analyse de la multiplication des chaînes de référence de ces symboles aux données, voir Varenne, "Chains of Reference in Computer Simulations" (à paraître), <http://philpapers.org/rec/VARCOR>.

⁵⁹ Si on possède un savoir biologique solide et une théorie des processus qui affectent des individus à un certain niveau (comme le niveau des molécules, puis celui des cellules), cela signifie que l'on dispose de concepts pour les décrire comme aussi des instruments pour en mesurer ou détecter certaines propriétés et donc pour identifier (i.e. trouver empiriquement leurs valeurs) la plupart des paramètres des sous-modèles du modèle de simulation : il est donc *méthodologiquement utile et fécond* que les individus informatiques choisis dans le *modèle de simulation* (au sens 1 que nous donnons à cette expression : voir plus bas) réfèrent aussi effectivement à des individus ayant réellement un sens biologique et qui soient étudiés, instrumentés, d'un point de vue de la ou des disciplines en question.

leur niveau et comme étant immergés dans des variables d'états supposer émerger à un niveau supérieur (dans ce cas-là les variables n'émergent pas effectivement des interactions au cours de la computation), variables qui s'imposent à eux et que l'on peut en effet parfois calculer directement à partir d'un modèle mathématique macro lorsqu'il est disponible mais que l'on doit tout de même encore simuler numériquement justement pour que l'objet individuel puisse s'en saisir⁶⁰ : simulations à base de règles et simulations numériques sont alors mises en œuvre et entrelacées pas à pas dans la computation. La simulation est bien alors de type mixte. L'objet informatique et son environnement local y servent de lieu et d'échelle de rencontre minimaux de manière à ce que le calcul simultané des différentes règles implémentées et par ailleurs diversement motivées d'un point de vue référentiel⁶¹ soit possible.

III. Modèle et simulation

Ces analyses différenciées de la simulation nous semblent pouvoir permettre de mieux comprendre certaines des mutations contemporaines les plus remarquables dans les rapports complexes et multiples entre modèles et simulations.

III.1. Simulation de modèle

La simulation d'un modèle formel au sens large désigne bien toujours en un premier sens le procédé même de computation de ce modèle, cela quel que soit le principe et le type de modèle (ou de systèmes de modèles) sur lequel se fonde la simulation en question. Cette computation - la simulation de modèle au sens large - peut toutefois donner lieu à des types de simulation, en un second sens plus strict du terme, nettement différents : les trois types de simulation précédemment analysés. La simulation peut n'être qu'imitation du fonctionnement pas à pas du modèle : c'est alors une simulation numérique. Mais elle n'est pas obligatoirement en même temps une imitation du système cible modélisé. Emportés par leurs conceptions représentationalistes des modèles - et c'est bien compréhensible étant donné la puissance des théories et des modèles dont ils disposent - les physiciens numériques font parfois des raccourcis erronés à ce sujet, comme dans ce genre d'affirmation à portée excessivement générale :

Un modèle mathématique est une représentation ou une interprétation abstraite de la réalité physique qui est accessible à l'analyse et au calcul. La simulation numérique permet de calculer sur ordinateur les solutions de ces modèles, et donc de simuler la réalité physique.⁶²

Après nos analyses, on comprend bien que le « et donc » de la seconde phrase est très contestable. Le terme simulation est en fait utilisé ici dans deux sens différents. Il n'est pas possible d'inférer de manière générale le second sens du terme *simulation* (ici, la simulation du système cible)

⁶⁰ C'est le cas des travaux de thèse de Raphaël Duboz (2004) cités dans notre chapitre *infra* : <http://agents.cirad.fr/index.php/Rapha%EBI+DUBOZ/theseRD>

⁶¹ Ce peut être en effet des règles imposées par une numérisation d'un espace, d'un temps ou d'une variable (dans ce cas, elles relèvent de l'aspect *simulation numérique* de la simulation informatique : ainsi du support des cartographies numériques ou des Systèmes d'Information Géographique (SIG) en géographie de modélisation) ou des règles imposées par une théorie sur le comportement de l'objet (dans ce cas, elles relèvent de l'aspect *simulation dirigée par des règles* de la simulation informatique en question : ainsi des agents géographiques plongés dans un SIG).

⁶² Grégoire, Allaire, *Analyse numérique et optimisation*, Paris, Editions de l'Ecole Polytechnique, 2007, p. 2.

du premier (ici, le calcul de modèle). C'est d'ailleurs la raison pour laquelle, dans les publications scientifiques, a prospéré depuis peu l'expression à visée rectificante de « modèle de simulation ». Mais, malheureusement, utilisée là aussi dans des contextes très différents et par des modélisateurs ou des épistémologues fondant leurs pratiques ou leurs analyses sur des fonctions référentielles nettement différentes, elle est devenue ambiguë à son tour.

III.2. Modèle de simulation-1

Lorsque les scientifiques veulent insister sur le fait que leur modèle a d'abord pour fonction de permettre de dénoter directement des entités, des propriétés ou des processus du système cible, ils préfèrent l'expression de *modèle de simulation (simulation model)* à celle de modèle tout court ou de modèle mathématique. C'est le cas en particulier dans les modélisations à base d'agents en biologie, économie, sociologie ou géographie par exemple. Un *modèle de simulation* désigne alors non pas une équation mais un ensemble (ou encore un moule ou modèle selon le sens étymologique du mot « moule ») de symboles donc de modes de *dénotation externe* et de règles symboliques reliées dans une infrastructure de programmation de type le plus souvent orientée-objets. C'est ce genre de modèles que l'économie, la sociologie ou la géographie à base d'agents (nommées parfois « computationnelles » bien qu'il y ait des nuances⁶³) privilégient, comme en témoignent ici les chapitres de Carole Knibbe, Olivier Gandrillon, Sylvain Cussat-Blanc, Hervé Luga, Yves Duthen, Hugues Berry, Guillaume Beslon, Bernard Walliser, Arnaud Banos, Léna Sanders, Juliette Rouchier, Guillaume Deffuant, Sylvie Huet & Timoteo Carletti ou encore Martine Robert. Mais on peut également ranger les articles de Randy Thomas (sur la patient virtuel) et de Hervé Wozniak (sur l'observatoire virtuel) dans la catégorie des contributions qui présentent elles aussi des modèles de simulation et même des *modèles de simulation à base d'ontologies* (cas spécifique à l'intérieur de la troisième catégorie de simulation). Le formalisme de standardisation UML ou des formalismes apparentés interviennent dans ce contexte de plus en plus souvent.

Remarquons que cette emphase sur la référence externe dans ce genre de modèle de simulation ne dit rien encore du degré plus ou moins stylisé des corrélats réels étudiés : il peut y avoir un usage théorique ou de pure exploration conceptuelle ou de recherche de mécanismes plausibles de modèles de simulation à base d'objets ou d'agents⁶⁴, comme il peut y en avoir un usage de classification, d'interopérabilité et d'échange de données⁶⁵, comme il peut y en avoir enfin un usage quasi-empirique car de réplification détaillée du terrain empirique et de sa dynamique particulière⁶⁶. Le chapitre de Magali Ochs sur la simulation des émotions est également remarquable à cet égard : à la différence de ceux qui ont été précédemment cités, il ne présente certes pas de modèles de simulation à base d'objets ou d'agents interactifs. Mais il présente tout de même des modèles de *simulation directe* de certaines propriétés précises d'un seul système cible, en l'occurrence le visage humain. Or, il s'agit bien, là aussi, de modèle de simulation, c'est-à-dire de modèle conçu *pour* la simulation, au sens d'une dénotation directe externe du système cible. C'est ce type général de modèle de simulation - mais dont

⁶³ Voir à ce sujet les analyses et la bibliographie de Varenne, « Les simulations computationnelles dans les sciences sociales », *Nouvelles perspectives en sciences sociales*, vol. 5, n° 2, 2010, p. 17-49 <http://www.erudit.org/revue/npss/2010/v5/n2/044073ar.html?vue=resume>.

⁶⁴ Dans ce cas, les entités et propriétés dénotées par les symboles et règles élémentaires des modèles de simulation sont hautement stylisées : on cherche alors à tester la crédibilité de l'hypothèse de certains mécanismes d'interaction généraux. Et de tels modèles de simulation visent l'explication ou la compréhension. C'est nous semble-t-il souvent le cas des travaux de Guillaume Deffuant et son équipe, comme aussi de certains des travaux d'Arnaud Banos et Léna Sanders (mais pas tous en ce qui concerne ces derniers auteurs).

⁶⁵ Voir les contributions de Randy Thomas et Hervé Wozniak.

⁶⁶ C'est le cas des modèles de simulation de l'archéologue Tim Kohler ("Simulating Ancient Societies", *Scientific American*, 293, 2005, p. 77-84 <http://libarts.wsu.edu/anthro/pdf/Kohler%20et%20al.%20SciAm.pdf>) cités par Martine Robert *infra* : ils sont à base empirique forte. C'est le cas aussi du recours à la modélisation par agents de certains trafics de piétons ou de voiture dans une architecture donnée et servant au test virtuel d'un aménagement urbain à venir, par exemple : dans ce cas on cherche davantage à anticiper *une expérience* qu'à *comprendre* ou *expliquer* par le moyen du test de mécanismes généraux.

on soupçonne ici qu'il en est également de nombreuses variétés - que nous pouvons appeler *Modèle de simulation-1*. Ce type de *modèle de simulation* est donc un *modèle pour la simulation du système cible*. Significativement, le rôle de l'infrastructure informatique, des langages dédiés et des métamodèles y est de plus en plus grand.

III.3. Modèle de simulation-2

Les articles d'Isabelle Peschard et Julie Jebeile ci-dessous témoignent de leur côté de la vitalité d'une autre acception, tout aussi recevable mais différente, de l'expression « modèle de simulation ». Dans le cadre d'une simulation numérique, le plus souvent en physique, l'expression *modèle de simulation* peut en effet vouloir désigner ce que Paul Humphreys⁶⁷ appelle le *computational template*, c'est-à-dire littéralement le *gabarit computationnel* applicable au modèle si l'on veut en faire la simulation : c'est ce gabarit qui permet concrètement que le *computer* puisse effectivement se saisir du modèle mathématique à simuler pour en faire la computation. Il s'agit donc d'une modélisation préalable - préparatoire et de second degré - du modèle mathématique initialement proposé. Dans son chapitre, qui présente essentiellement des simulations numériques, Stéphane Colombi parle à cet égard de *modélisation numérique*. Dans leur chapitre commun, Eric Brun, Samuel Morin et Vincent Vionnet parlent aussi de *modèle numérique* du manteau neigeux car il s'agit pour eux essentiellement de chercher les bonnes discrétisations des variables déjà disponibles dans les équations de la mécanique et de la thermodynamique⁶⁸. À l'issue de ce qu'il faut donc clairement concevoir comme une pratique de modélisation préparatoire, le *modèle de simulation* en ce sens peut être justement nommé *modèle numérique*. C'est alors un modèle numérique non pas du système cible mais du modèle mathématique initial : il peut être identifié à une forme modifiée et déplacée (substituée) du modèle mathématique initial, cela pour les besoins de la simulation de ce modèle initial. Mais ces modèles de simulation, qui sont des modèles numériques préparatoires, n'existent justement que dans les cas de simulation dirigée surtout par des modèles mathématiques non computationnels, c'est-à-dire précisément dans les cas de simulation numérique (type 1 de simulation). Ainsi, toute simulation ne recourt pas systématiquement à un modèle de simulation en ce sens-là. Nous proposons d'appeler *Modèle de simulation-2* ce type de modèle. Ce type de modèle peut valablement être dit un *modèle de simulation* au sens où c'est un *modèle pour la simulation d'un modèle* et non un *modèle pour la simulation d'un système cible*. Réfléchir à cette pratique de modélisation préparatoire suppose de réfléchir par exemple sur les importants problèmes de discrétisation, d'échantillonnages du modèle mathématique initial et sur leurs limites.

Toutefois, concernant le chapitre sur la modélisation du manteau neigeux, on peut faire observer que les auteurs décrivent un cas de ce qui nous apparaît comme une tendance actuelle assez répandue depuis une trentaine d'année en modélisation de systèmes mixtes, à savoir la tendance à passer d'une approche eulérienne dans laquelle « la description temporelle des variables s'effectue sur une grille invariante » (*ibid.*, section 3) à une approche lagrangienne. Dans l'approche lagrangienne, on suit le devenir des individus particuliers et on tâche de sommer leurs comportements⁶⁹. Dans le cas de la neige, il s'agit de couches de neiges de nature diverse et de nombre variable (donc la grille eulérienne ne pourrait être constante) qu'il faut suivre dans leur profil vertical et dans leurs interactions mécaniques et thermodynamiques. Cette tendance s'explique par le fait que les approches

⁶⁷ Paul Humphreys, 2004, *op. cit.*

⁶⁸ Ce serait à nuancer toutefois : car ils introduisent aussi directement des variables empiriques (dendricité, sphéricité) qui jouent le rôle de paramétrisations commodes pour le calcul et font que leur modèle numérique prend partiellement aussi une allure de modèle de simulation informatique à base d'agents hétérogènes. Ces paramétrisations empiriques sont aussi le fait récurrent de bien des modèles de climat dont Hervé Douville nous fournit ici une analyse comparée : voir son chapitre, section 4, en particulier.

⁶⁹ Voir aussi à ce sujet le chapitre de Hervé Wozniak, *infra*, section 5.

lagrangiennes - comme aussi les approches à base d'individus ou d'agents en écologie, économie et sociologie - permettent de résoudre, grâce à la discrétisation, des problèmes de mixité, donc des problèmes non co-théorisés⁷⁰ dus eux-mêmes à l'intrication de certains phénomènes physiques ou chimiques hétérogènes⁷¹. Il n'en demeure pas moins que ce type de modèle, à savoir le modèle numérique de simulation, même si sa discrétisation tend parfois à être partiellement objectifiante (avec des cellules, des couches, des microstructures, etc.) garde encore pour base principale la discrétisation de variables préalablement données dans des équations théoriques : c'est donc un modèle de simulation-2.

On pourrait enfin être tenté d'identifier ce type de *modèle de simulation* à ce que Bernard P. Zeigler et son équipe nomment un *simulator*. Ce terme désigne dans son contexte « tout système de computation (tel qu'un processeur unique, un réseau de processeurs, l'esprit humain ou plus abstraitement un algorithme) capable d'exécuter un modèle pour générer son comportement »⁷². Le formalisme DEVS issu de la même équipe permet justement de formaliser de manière générique un tel système de computation. Mais, en réalité, on ne peut pas dire qu'il s'agisse d'un modèle mais bien plutôt d'un procédé computationnel réglé disposant d'un langage (en l'occurrence DEVS) permettant d'exprimer de manière générique ce qu'est une simulation de modèle : à savoir *une stratégie de symbolisation à computations et avec changement de niveaux*, précisément comme nous l'avons caractérisé plus haut⁷³. Significativement, Zeigler n'emploie d'ailleurs jamais le terme de modèle pour parler du *simulator* ou de son produit final. L'article de Raphaël Duboz et Jean-Pierre Müller (*infra*) aborde avec finesse ce rapport entre modèles et formalismes de simulation, dont justement DEVS.

IV. Épistémologies et pratiques

Les chapitres que l'on va lire sont d'inspirations diverses, comme nous l'avons dit. Nous n'allons pas les résumer. En lieu et place de tels résumés, nous proposons de donner là aussi quelques grands repères afin que le lecteur puisse situer ces contributions les unes par rapport aux autres, et notamment de façon à ce qu'il en perçoive la réelle complémentarité.

Tous les chapitres que nous avons rassemblés relèvent plus ou moins d'un ou - au maximum - de deux ou trois des six grands types de travaux concernant les modèles et les simulations. Ils sont d'abord tantôt d'épistémologie, tantôt de méthodologie. Une méthodologie décrit empiriquement les méthodes qui s'imposent factuellement dans tel ou tel domaine de la science et montre au besoin leur fécondité. Elle se nourrit donc directement des pratiques d'une science : d'où le sous-titre que nous avons choisi : « Épistémologies et pratiques ». Une méthodologie peut être elle-même focalisée sur l'étude d'un cas et sur ce qui légitime particulièrement le recours à tel ou telle méthode pour ce cas :

⁷⁰ Et c'est là rejoindre précisément ce que nous appelons la fonction 15 des modèles : l'hybridation de théories.

⁷¹ Voir aussi l'histoire déjà ancienne de la simulation moléculaire *ab initio* spécialement orientée individus en physique numérique du solide et en chimie numérique. Voir ce qu'en dit Margaret Morrison dans "Models, measurement and computer simulation: the changing face of experimentation", *Philosophical Studies*, 143, p. 45 <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11098-008-9317-y#page-1>. Il est tout à fait compréhensible qu'elle en tire un argument en faveur du caractère nettement empirique de la simulation : voir toutefois notre analyse des fondements implicites de ce genre d'argumentation dans Varenne, "Chains of Reference in Computer Simulations" (à paraître), <http://philpapers.org/rec/VARCOR>.

⁷² Bernard P. Zeigler, Herbert Praehofer, Tag Gon kim, *Theory of Modeling and Simulation. Integrating Discrete Event and Continuous Complex Dynamic Systems*, New York, Academic Press, 2000, 1st édition: 1976, p. 30. Notre traduction. Les auteurs ajoutent une note qui précise que dans la première édition de cet ouvrage majeur (celle de 1976), le *simulator* était nommé plus génériquement *computer*. Pour eux, le terme *simulator* est plus spécifique que celui de *computer*. Cela est précisément dû au fait qu'un *computer* peut aussi émuler un calcul formel et n'est pas toujours un simulateur, comme nous l'avons d'ailleurs précisé plus haut.

⁷³ D'ailleurs, Zeigler et son équipe insistent eux aussi sur le caractère central du changement de niveau symbolique pour toute simulation, donc en particulier pour toute *simulation de modèle* : *ibid.*, pp. 11-14. Nous revenons justement sur la parenté mais aussi sur la non réductibilité entre ces concepts de *théorie de la simulation* (élaborés par des informaticiens) et notre propre caractérisation épistémologique de la simulation dans "Framework for Models & Simulations with Agents in regard to Agent Simulations in Social Sciences: Emulation and Simulation", in A. Muzy, D. Hill & B. Zeigler (eds), *Activity-Based Modeling and Simulation*, Clermont-Ferrand, Presses Universitaires Blaise Pascal, pp. 53-84, http://www.msh-clermont.fr/IMG/pdf/04-Varenne_53-84.pdf

c'est une méthodologie appliquée. Ou sinon, elle peut être elle-même déjà comparativiste et dès lors plus théorique que la précédente. Nous avons les deux types de travaux ici.

Une épistémologie, quant à elle, essaye de s'expliquer et de fonder les méthodes et les concepts scientifiques sur des raisonnements supplémentaires qui les légitiment de manière autonome : elle cherche donc peu ou prou à normer - *i.e.* à penser par rapport à des normes du raisonnement ou par rapport à d'autres normes encore - les formes du travail scientifique, au moins pour expliciter ou clarifier les fondements de ce domaine du savoir qu'est la science, si ce n'est même pour imposer parfois un certain contrôle sur lui, contrôle qu'on peut légitimement lui contester. Mais, qu'on le veuille ou non, les politiques de la science ont justement implicitement recours à une forme d'épistémologie. Et ce n'est pas toujours la plus clairvoyante. Il est donc sans doute préférable de se saisir explicitement des épistémologies qui ont cours, de les mettre *au jour* et de les mettre collectivement et régulièrement *à jour*.

Les travaux d'épistémologie peuvent être d'épistémologie théorique : ils insistent alors sur la définition des concepts et ensuite sur l'argument qu'ils cherchent à montrer à leur sujet, cela de manière serrée et parfois même polémique. Les travaux d'épistémologie appliquée partent quant à eux des justifications de terrain elles mêmes épistémologiques et pas seulement techniques, celles mêmes que les scientifiques donnent de leurs pratiques et de leurs méthodes, même s'ils ne les prennent pas toujours pour argent comptant : il s'agit d'une épistémologie construite en lien et en interaction forte avec les scientifiques. Cette épistémologie appliquée comme l'épistémologie théorique peuvent être tour à tour employées par le même auteur : il serait vain d'opposer les deux.

D'autre part, elles peuvent être chacune à leur tour subdivisées : selon la nature de leur objet. Ici, nous disons que nous avons des travaux d'épistémologie théorique sur des travaux théoriques quand il s'agit pour l'auteur d'analyser en épistémologue théoricien des concepts eux-mêmes à portée essentiellement théorique. On peut parler au contraire d'épistémologie théorique des sciences appliquées (ici donc des modélisations appliquées) quand l'argument théorique autonome prend ponctuellement son ancrage dans des études de cas de modélisation et mettant en œuvre des travaux de terrain, sans pour autant que la justification des scientifiques soient thématiques pour elles-mêmes. Les travaux d'épistémologie appliquée peuvent à leur tour avoir des objets scientifiques de nature plus proprement théorique : c'est alors une épistémologie certes prioritairement sensible aux discours des scientifiques mais qui privilégie l'approche, en épistémologie appliquée, de travaux scientifiques de nature plus proprement théorique. Il y a enfin une approche d'épistémologie appliquée qui part de travaux de modélisation eux-mêmes assez largement applicatifs : assez naturellement la sensibilité aux retours permanents du terrain de cette sorte d'épistémologie appliquée explique sa parenté et son croisement avec certains travaux directement méthodologiques des scientifiques eux-mêmes.

Encore une fois, ces catégories ne visent pas à enfermer les chapitres dans des cases en nombre limité. Car la plupart d'entre eux présentent différents aspects de ces six approches fondamentales. D'autre part, la liste de ces catégories n'est pas close : on pourrait affiner en disant par exemple qu'il y a une épistémologie appliquée orientée par la sociologie et non par la philosophie ni par la clarification conceptuelle recherchée pour elle-même (il y en aura des exemplaires dans le second volume) ou bien encore qu'il y a des épistémologies appliquées des modèles appliquées orientées elles-mêmes par une conception venue tantôt de la physique, tantôt de l'informatique, tantôt encore de la biologie, de la géographie ou de l'histoire, tant il est vrai que les points de vue des auteurs - même devenus épistémologues - se nourrissent de certaines de leurs compétences proprement scientifiques, compétences qui ne peuvent guère être universelles. Il n'empêche : ces regards croisés nous semblent toujours féconds et propres à soulever les bonnes questions.