



HAL
open science

Histoire de la modélisation : quelques jalons

Franck Varenne

► **To cite this version:**

Franck Varenne. Histoire de la modélisation : quelques jalons. "Modélisation, succès et limites", CNRS; Académie des Technologies, Dec 2016, Paris, France. <hal-02495473>

HAL Id: hal-02495473

<https://hal.science/hal-02495473v1>

Submitted on 2 Mar 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.



HAL Authorization

Histoire de la modélisation : quelques jalons

Franck Varenne

Université de Rouen – UFR LSH
Rue Lavoisier
76821 Mont-Saint-Aignan
franck.varenne@univ-rouen.fr

RÉSUMÉ. Ce chapitre ne prétend à aucune exhaustivité quant à l'histoire de la modélisation. Il propose un panorama rapide ainsi qu'un regard sélectif choisi avec pour seule ambition d'être clarificateur et pour cela utile dans la pratique contemporaine. Dans un premier temps, il présente une classification des vingt principales fonctions des modèles. Ensuite, il propose de repérer et de caractériser deux tournants historiques majeurs dans l'histoire de la modélisation depuis le début du 20^{ème} siècle. Enfin, il entend montrer que, ces dernières années, sous l'effet de ces tournants mais aussi des développements de nouvelles techniques tant matérielles que formelles, la modélisation permet de plus en plus une complémentarité opérationnelle des différentes fonctions des modèles à la différence des périodes précédentes, si bien que les questions suivantes concernant les limites de la modélisation n'appellent plus de réponses aussi tranchées que par le passé mais au contraire des réponses méthodologiquement et épistémologiquement nuancées et informées : faut-il toujours plus de puissance de calcul ? Faut-il toujours préférer un modèle simple à un modèle complexe ? La modélisation reste-t-elle soit du côté de la recherche académique, soit du côté du développement industriel ? Ce chapitre entend montrer spécifiquement que, du fait des développements techniques récents, la pluralité des fonctions des modèles s'est confirmée et même amplifiée, mais, qu'en même temps, certaines de ces fonctions tendent à être nouvellement compatibles voire complémentaires, parfois dans un même modèle complexe ou dans un même système de modèles, sans nécessairement toujours s'exclure.

MOTS-CLEFS : modèles, modélisation, histoire, épistémologie, pluralisme, complexité.

1. Introduction

On constate un essor continu des pratiques de modélisation dans les sciences et techniques depuis le début du 20^{ème} siècle, en particulier depuis les années 1930. Ce mouvement est massif mais aussi pluriel. Il présente de très nombreux visages. Il est tellement divers que certaines des épistémologies ou méthodologies générales qui ont, çà et là, tenté de le circonscrire ne manquent pas en fait d'entrer en conflit, de se contrarier, et, en un sens, de ne valoir finalement que localement ou pour des pratiques bien spécifiques. On continue cependant souvent et majoritairement à opposer la conceptualisation élégante et économe - qu'il faudrait à tout coup préférer - aux calculs massifs et jugés forcément insignifiants des « dévoreurs de nombres » comme sont parfois qualifiés nos ordinateurs. Or, dans les deux cas, il y a bien des modèles en jeu, de natures certes différentes. On oppose aussi les modèles complexes aux modèles simples, cela en toute généralité, en arguant du fait - supposé définitif et acquis - que toute modélisation doit chercher à simplifier, et que donc, nécessairement croit-on, toute modélisation doit chercher à produire une « représentation simple ». Enfin, on exige souvent qu'un modèle choisisse son camp : il sert tantôt à la recherche théorique, académique ou en amont, tantôt à la recherche applicative et au développement industriel ; mais il ne semble pas pouvoir conjoindre les deux approches.

Face à cette pluralité persistante des injonctions méthodologiques comme des épistémologies appliquées sur le terrain, on pourrait en venir à penser que ce n'est pas bien grave : pour juger de la pertinence et de la validité d'une modélisation, il suffirait de s'en remettre chaque fois au contexte normatif précis de la recherche en question ainsi qu'à la demande sociale spécifique qui accompagne le projet. Mais adopter ce point de vue trop exclusivement relativiste peut conduire à remettre en question l'unité comme la cohérence propre de la méthode scientifique. Si on donne trop tôt et exclusivement raison au pluralisme des normes et méthodes, les sciences et techniques risquent de n'être reconnues que comme de pures productions rhétoriques parmi d'autres, dépendant exclusivement de leur contexte de production ainsi que des forces sociales singulièrement en présence. La conséquence de ce relativisme exclusif réside dans le fait que l'on se retrouve alors plus que jamais désarmé face à la menace de ce qu'il est aujourd'hui convenu d'appeler les « vendeurs de doute ». Car, si les modèles sont pluriels, si leurs normes de validation sont chaque fois fluctuantes et complètement dépendantes du contexte, il devient tout à fait possible - voire légitime - de penser pouvoir faire dire ce que l'on veut à un modèle, pourvu qu'il soit suffisamment financé - en tout cas plus que d'autres - et seulement raisonnablement - c'est-à-dire comme d'autres - validé.

Cette conséquence épistémologique paraît dangereuse et, heureusement, très contestable. En fait, il est de nombreux indices qui montrent que la diversité des types de modélisation et de leurs fonctions associées n'est pas infinie, et qu'elle n'a

donc pas, pour cela, à être uniquement et exclusivement rapportée au contexte chaque fois singulier de la production du modèle, en particulier si l'on souhaite aussi pouvoir formuler ses normes de validité et de validation. Un des premiers objectifs de ce chapitre sera justement de montrer que cette diversité, bien que grande, reste finie et qu'elle peut être rendue compréhensible et caractérisable au moyen d'analyses comparatives de type épistémologique. À cette fin, la seconde section de ce chapitre présentera d'abord une classification des modèles en vingt fonctions principales. Elle tâchera d'esquisser la preuve que les normes de calibration, de vérification et de validation de ces modèles dépendent de ces fonctions qu'on veut prioritairement leur faire assurer. La troisième section de ce chapitre contrebalancera l'approche trop synchronique - et pour cela en partie artificielle - de la section précédente. Elle proposera une succincte mise en perspective historique en choisissant de se concentrer sur deux des principaux tournants qu'ont successivement connu les pratiques de modélisation depuis le début du 20^{ème} siècle : le tournant formel puis le tournant computationnel. Cette section montrera en particulier comment ces deux tournants ont eu pour effet majeur de modifier les relations structurelles entre modèle et théorie physique, dans un premier temps, puis, plus radicalement, entre modèle et formalisme mathématique, dans un second temps. La section quatrième montrera que ces assouplissements dans les déterminations structurelles réciproques ont eux-mêmes pour effet aujourd'hui d'autoriser une intrication et une complémentarité bien plus fortes entre les différentes fonctions des modèles, parfois à l'intérieur d'un même modèle ou d'un même système de modèles, ces systèmes étant rendus parfois spécifiquement complexes. Ce qui a pour effet en retour de nous obliger à réarticuler et à diversifier les réponses à nos trois questions récurrentes concernant les limites des modèles.

2. Etat des lieux sur les fonctions des modèles

2.1. Modélisation et modèle

Mais d'abord, qu'appelle-t-on une modélisation ?¹ Disons, pour faire bref, que le terme modélisation ne désigne pas un modèle mais désigne toute la procédure² ou toute la pratique individuelle ou collective au cours de laquelle on recourt à un ou - le plus souvent - à plusieurs modèles, cela de manière systématique et

¹ Cette section synthétise la classification qui a été publiée sous des formes légèrement différentes dans (Varenne, 2013) et (Varenne, 2014).

² On peut même parler de « stratégie de construction et d'utilisation de modèles » (Pavé 1994 : 25).

éventuellement itérative, en s'orientant selon une certaine perspective et selon certains objectifs d'enquête bien définis au départ. Au final, la pratique de la modélisation consiste à choisir, concevoir ou produire un ou des modèles pour lesquels on a les moyens de les évaluer comme étant parmi les plus performants dans une ou plusieurs des fonctions de connaissance attendues (cognition pratique ou théorique), cela dans un cadre donné.

Qu'appelle-t-on alors un modèle ? On l'aura compris avec la caractérisation précédente, la fonction de connaissance entendue au sens large est centrale dans la modélisation en contexte scientifique et technique. Suivant la caractérisation qui nous paraît la plus souple et donc la mieux adaptée et adaptable, sans être complètement attrape-tout, celle de Marvin Minsky, nous dirons ici que « *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* »³. Certes, un modèle est souvent prioritairement défini ou caractérisé dans la littérature scientifique comme une représentation : on lit souvent qu'un modèle est avant tout la représentation simplifiée d'un système cible. Mais la caractérisation de Minky présente le premier avantage de rappeler que ce n'est pas absolument nécessaire. Dans certains cas, il peut être conçu plutôt à l'image d'une grille de lecture, d'un filtre, d'une lentille grossissante. Jean-Marie Legay voyait ainsi les modèles comme des outils permettant d'amplifier l'expérimentation mais pas prioritairement comme des représentations⁴. Alain Pavé propose une caractérisation qui peut se révéler plus large et consensuelle que celle de Legay puisqu'elle fait droit à la fonction de sélection d'aspects qu'opèrerait tout modèle et à laquelle Legay attachait tant d'importance, tout en maintenant l'idée de représentation : « *un modèle est une représentation symbolique de certains aspects d'un objet ou d'un phénomène du monde réel* »⁵.

Dans cette section, nous nous rallierons toutefois à la caractérisation plus large de Minsky dès lors que l'idée même de symbole, elle aussi problématique, n'y est pas non plus convoquée. Cette caractérisation présente en effet le deuxième avantage de suggérer qu'un modèle est déterminé selon une double relativité : relativité par rapport à la question principale posée, relativité par rapport à l'observateur précis qui pose cette question. La question est posée dans un certain contexte par une catégorie de personnes qui y ont un certain intérêt cognitif, et pour un certain objectif.

Le troisième avantage de cette caractérisation tient au fait que le modèle est conçu comme étant, lui aussi, un « objet », même si ce peut être bien sûr une équation mathématique ou un système d'équations. Avec cette caractérisation supplémentaire, intervient l'idée qu'un modèle, même si sa conception a pu

³ (Minsky 1965).

⁴ (Legay 1997).

⁵ (Pavé 1994 : 26).

initialement s'en inspirer, n'est jamais uniquement une formulation, une façon de parler, une tournure de langage, une simple analogie, mais qu'il va jusqu'à donner existence à un certain objet dont le comportement n'est pas complètement élucidé ni évident dès le moment où on le choisit, le définit ou le crée. Un modèle doit posséder une certaine indépendance ontologique en ce sens, un minimum de quant à soi ontologique. C'est cela qui permet d'expliquer que dans les pratiques de modélisation, on se propose souvent d'explorer le comportement encore mal connu de tel ou tel modèle, d'expérimenter sur le modèle, comme on expérimente justement et couramment sur des *objets* physiques.

2.2. La fonction générale des modèles

Au regard de la caractérisation de Minsky et de ses particularités, quelle est finalement la fonction la plus générale qu'assure un modèle pour le questionneur ? Il apparaît que c'est celle d'une médiation, plus exactement celle d'une *facilitation de médiation*, cela dans le cadre d'une enquête à visée cognitive, à tout le moins pour ce qui est des modèles en sciences et techniques. On recourt au modèle quand le questionnement ne peut être direct : il y faut une médiation. Mais quelles sont les grandes fonctions et fonctions spécifiques de facilitation de médiation ? L'énumération ci-dessous entend en proposer une classification et une synthèse⁶. Il est entendu qu'un même modèle peut assurer simultanément plusieurs de ces fonctions spécifiques. Toutefois, classiquement, il est considéré qu'un même modèle assure un petit nombre et, au maximum, deux ou trois de ces fonctions, pas plus, cela dans la mesure où les contraintes méthodologiques associées à chaque fonction ont souvent semblé se contredire irrémédiablement.

2.3. Première grande fonction : faciliter une observation, une expérimentation

Dans ce premier type de médiation, ce que le modèle facilite est avant tout l'accès sensible et/ou le rapport interactif avec l'objet cible. Le modèle sert alors éventuellement de substitut au système cible.

- 1) Rendre sensible (écorché de cire, maquette du système solaire, maquette de dinosaure...).
- 2) Rendre mémorisable (modèles pédagogiques, diagrammes, comptines...).

⁶ Source principale : (Varenne 2014). Dans cet ouvrage, je prolonge l'analyse en distinguant ensuite les *principes* et les *natures* des modèles. Un modèle doit pouvoir être ainsi caractérisé complètement si l'on connaît sa fonction, son principe et sa nature.

Franck Varenne

- 3) Faciliter l'expérimentation en la concentrant sur un type d'objet ou organisme modèle (modèles vivants en biologie: drosophile, porc, E. coli...) facilement disponible (pour des raisons matérielles, financières, techniques, morales, déontologiques...).
- 4) Faciliter la présentation de l'expérimentation (non la représentation de l'objet expérimenté) *via* un modèle statistique d'analyse de données.

2.4. Deuxième grande fonction : faciliter une présentation intelligible

La présentation cette fois-ci intelligible peut se faire *via* une représentation mentale figurée ou schématique ou même déjà *via* une conceptualisation et une interaction de concepts, un concept étant une idée générale bien définie et applicable à certains objets ou phénomènes réels ou réalisables.

- 5) Faciliter la compression et la synthèse de données disparates pour l'utilisation ultérieure : modèles de données. Certains positivismes ou instrumentalismes ont souvent considéré à tort qu'il n'existait quasiment que ce type de fonction pour les modèles.
- 6) Faciliter la sélection et la classification des entités pertinentes dans un domaine : modèles conceptuels, modèles de connaissance, ontologies, modèles d'objets typés.
- 7) Faciliter la reproduction et l'extrapolation d'une évolution observable : modèle descriptif, modèle phénoménologique, modèle prédictif, analyse prédictive, *data analytics*.
- 8) Faciliter l'explication d'un phénomène en donnant à voir ou à intuitionner ses mécanismes d'interaction élémentaires : modèles explicatifs (ex. : modèles mécanistes en physiques, modèles individus-centrés en écologie ou en sociologie).
- 9) Faciliter la compréhension d'un phénomène en donnant à voir les principes qui gouvernent une dynamique d'ensemble proche de celle qui est observée : modèles à principe variationnel, modèles à optimisation (ex. : modèles topologiques ou à systèmes dynamiques en morphogenèse).

2.5. Troisième grande fonction : faciliter une théorisation

Un modèle se distingue fondamentalement d'une théorie, même s'il peut passer parfois pour une théorie approchée. Une théorie peut être définie comme un ensemble d'énoncés - éventuellement formalisés et/ou axiomatisés - formant système et donnant lieu à des inférences susceptibles de valoir descriptivement pour tout un domaine de réalités ou pour tout un type de phénomènes. Un modèle peut servir de médiateur dans l'entreprise de théorisation, et cela de diverses manières.

- 10) Faciliter l'élaboration d'une théorie non encore mature (modèle théorique).
- 11) Interpréter une théorie, en montrer sa représentabilité, comme cherche à le faire Boltzmann (modèle de théorie, de type 1).
- 12) Illustrer une théorie par une autre théorie, comme cherche à le faire Maxwell ; recherche d'analogies pour le calcul (modèle pour la théorie).
- 13) Tester la cohérence interne d'une théorie formelle, en lien avec la théorie mathématique des modèles (modèle de théorie, de type 2).
- 14) Faciliter l'application de la théorie, i.e. son calcul et sa reconnexion avec le réel (ex. : modèles heuristiques ou asymptotiques des équations de Navier-Stokes).
- 15) Faciliter l'hybridation de théories dans les systèmes hétérogènes (ex. : modèles de systèmes physiques polyphases).

2.6. Quatrième grande fonction : faciliter la médiation entre discours

Pour cette fonction, il s'agit de faciliter la médiation, la confrontation et la circulation des idées et des représentations entre discours portés par plusieurs types d'observateurs. Donc il ne s'agit plus d'une médiation supposée intervenir à l'intérieur d'un seul type de représentation ou d'un seul type de sujet observateur.

- 16) Faciliter la communication entre disciplines et chercheurs (ex. : partage de bases de données).
- 17) Faciliter l'écoute, la délibération et la concertation (ex. : Modèle RAINS pour les pluies acides favorisant une concertation autour de la qualité de l'air⁷).
- 18) Faciliter la co-construction d'hypothèses de gestion, par exemple pour les systèmes mixtes de type sociétés-nature (ex. : modélisation d'accompagnement ou modélisation interactive des systèmes agricoles).

⁷ (Kieken 2004).

2.7. Cinquième grande fonction : faciliter la médiation entre représentation et action

Pour cette fonction, la médiation n'a même plus lieu entre représentations imagées, conceptuelles ou plus généralement entre représentations discursives mais entre représentation et action. On pense ici aux modèles pour la décision et pour l'action.

- 19) Faciliter la décision et l'action rapides dans un contexte effectivement complexe (modèles de gestion d'épidémie, de gestion de catastrophes) où la fidélité du modèle au système cible n'est pas recherchée pour elle-même.
- 20) Faciliter la décision et l'action rapide dans un contexte où le modèle est auto-réalisateur et où il est, par conséquent, jugé contreproductif de faire l'hypothèse de la complexité ou de réalisme (ex. : modèles de produits dérivés en finance, habituellement auto-réaliseurs mais cycliquement auto-réfutants, d'où les krachs⁸).

2.8. Sur quelques conséquences : normes de méthode et relations entre fonctions

Soulignons une fois de plus, afin que ne demeure aucune ambiguïté à ce sujet, que bien des modèles assurent en réalité deux ou trois des fonctions précédemment citées. Simplement, certaines sont compatibles alors que d'autres le sont difficilement, en tout cas à première vue. Une carte de géographie par exemple assure au moins les fonctions n°1 (rendre sensible), n°2 (rendre mémorisable) et n°6 (sélectionner et qualifier les entités pertinentes). Un modèle mathématique d'un phénomène physique peut être à la fois explicatif (fonction n°8) et prédictif (fonction n°7). Mais il arrive parfois à de tels modèles d'assurer l'une de ces fonctions sans pouvoir assurer l'autre.

Nous ne pouvons rentrer ici dans le détail de la démonstration. Mais on se doute bien que les contraintes méthodologiques varient considérablement au gré des fonctions que l'on veut voir prioritairement assurées par le modèle en question. Par exemple, si la fonction prioritaire est la n°17 (concertation), le modèle doit mettre en scène des concepts permettant de faire transiter des idées générales sur le système cible d'un savoir disciplinaire à un autre, sans trop d'égards pour la reproduction détaillée des valeurs mesurées ou des données. Tandis que si la priorité est mise sur la fonction n°7 (modèle prédictif), tout le soin doit être au contraire apporté à la qualité et à la quantité des données prises en compte. Autre situation : si le modèle cherche à être théorique (fonction n°10), sa généralité va être prioritairement recherchée, alors que ce n'est pas forcément le cas d'un modèle substitut pour la

⁸ (MacKenzie 2004) ; (Aglietta 2008).

représentation (fonction n°3). Toutefois, pour le cas des organismes modèles en biologie et en médecine (fonction n°3), il se pose justement la question de la possible très forte spécificité du modèle : comment, si nous ne travaillons pas en même temps à montrer que les processus sous-jacents sont suffisamment génériques - donc non spécifiques - d'une espèce à une autre, voire d'un individu à un autre (d'où un certain besoin d'explication là aussi et donc de la fonction n°8), considérer que la substitution (fonction n°3) pourra être valide dans le cadre d'une expérimentation de médication déléguée par exemple (test de médicament sur des animaux modèles) ? Dans ce cas, la fonction n°3 semble exiger que la fonction n°8 soit aussi en partie assurée. Comme on ne peut ici que l'entrevoir à partir de ces exemples succincts, il y a donc certainement des compatibilités, des incompatibilités comme aussi des implications mutuelles entre certaines fonctions.

Cette classification des fonctions des modèles, qui ne prétend nullement être définitive ou complète, a proposé jusqu'à présent une mise en ordre raisonnée probablement utile, mais passablement anhistorique et statique. Pour les besoins même de sa cause, la classification écrase l'histoire et ne permet pas de comprendre directement les évolutions, les nouveaux défis comme les nouvelles tensions et interrogations à l'œuvre dans les pratiques contemporaines de modélisation. Jetons un œil maintenant sur les deux tournants majeurs qu'a récemment connus la modélisation.

3. Deux tournants majeurs dans l'histoire de la modélisation

Dans la section précédente, nous avons fait une place très synthétique à une lecture épistémologique et classificatoire des fonctions des modèles⁹. Dans cette section, il sera fait une place à l'histoire des modèles et des simulations. Mais elle restera là aussi extrêmement allusive et synthétique.

⁹ Pour des approfondissements, voir (Delattre & Thellier 1979, (Varenne & Silberstein 2013), (Varenne *et al* 2014) et leurs bibliographies.

3.1. *Le tournant formel*

Concentrons-nous d'abord sur ce qui peut apparaître à l'historien des modèles comme un des tournants majeurs de la modélisation, pour tout dire, comme étant le tournant qui a mis ou remis au premier plan les méthodes des modèles en sciences, à côté des pratiques expérimentales et des pratiques de théorisation : à savoir le tournant formel.

3.1.1. *Sa nature*

Même si on en connaît des signes avant-coureurs dès les années 1880 et même si on peut en retrouver des préfigurations dans l'œuvre antérieure de Fourier ou, plus tard, dans la pratique de Faraday ou Maxwell, le tournant formel de la modélisation intervient massivement, et de manière représentative, autour des années 1920-1940. Il consiste non directement en une révolution ni en une modification radicale des types de fonctions attribuées aux modèles, mais plutôt dans un changement de la nature substantielle préférentielle des modèles, ce qui aura certes des effets - mais indirects - sur l'économie des fonctions des modèles et sur les interactions entre fonctions. Qu'ils soient descriptifs, théoriques, substitutifs ou de données, les modèles deviennent de plus en plus souvent formels, ce qui signifie de nature mathématique essentiellement (statistique, algébrique, analytique).

Le recours aux mathématiques pour concevoir des modèles a eu un premier effet, en dehors des relations entre modèles à proprement parler, à savoir un effet sur les relations entre théories et formalismes mathématiques. Jusqu'à l'essor des modèles formels, les formalismes mathématiques étaient préférentiellement employés pour concevoir des *théories* ou des *lois*, mais non des modèles¹⁰. Nous avons vu plus haut comment on peut définir une théorie et sa fonction épistémique, ou fonction de connaissance. Une loi, quant à elle, peut être définie comme la formulation d'une relation constante, nécessaire et universelle entre des phénomènes ou des propriétés de choses. Il est significatif de voir que, alors même que leur fonction épistémique n'est pas identique à celle des modèles¹¹, bien des lois, du fait de leur nature souvent déjà formelle depuis longtemps (ainsi en est-il des lois dites de Kepler), ont été assez rapidement, entre les années 1920 et 1950, requalifiées et rebaptisées « modèles ». Ce fut principalement le cas pour les lois qui ne semblaient pas devoir s'accompagner d'une théorie susceptible de les fonder, de les déduire calculatoirement, au contraire des lois de Kepler qui peuvent être déduites par calcul de la théorie de Newton et qui ont pour cela, *a contrario* et donc significativement, conservé leur nom. Ce changement de nom affecta en revanche systématiquement

¹⁰ (Varenne 2010a).

¹¹ Car l'énoncé d'une régularité censée affecter le monde naturel ou social n'est pas identique à la facilitation d'une médiation dans une enquête cognitive.

certaines autres lois comme les « lois » logistiques, de Lotka-Volterra, d'allométrie, de puissance, de Reilly (dite aujourd'hui « modèle gravitaire »). Toutes ces relations, qui furent donc initialement formulées au titre plein et entier de « lois », sont préférentiellement appelées « modèles » aujourd'hui, même si bien des scientifiques ignorent ou ont perdu le souvenir de cette requalification.

3.1.2. Ses conséquences

Le tournant formel eut pour première conséquence majeure ce que nous proposons d'appeler un *a-physicalisme* des modèles, c'est-à-dire un agnosticisme physique. Nous entendons désigner par là le fait que ce tournant a libéré les pratiques de modélisation traditionnelles en permettant une formalisation mathématique plus directe, sans nécessaire besoin de passer par la représentation et la formalisation préalable d'un substrat physique comme tel, avec ses lois. Il ne s'agit toutefois pas de nier l'existence du substrat physique ni même son influence mais, simplement, de ne pas se prononcer, dans le modèle, au sujet de son rôle : d'où cette analogie avec ce qu'on appelle un agnosticisme.

Cet *a-physicalisme* a causé en retour un assouplissement du rapport des modèles à la théorie puisque la théorie physique n'était plus d'emblée convoquée, mais qu'on pouvait au contraire utiliser la modélisation formelle pour explorer les théories possibles : la fonction n°10 devenait possible et même légitime. La possibilité de concevoir et manipuler des modèles formels dépourvus de théorie préalable pour les fonder devenait pensable, au sens où une théorie formelle impeccable prenant la forme d'un système formel axiomatisée peut effectivement provisoirement manquer. C'est là que certaines lois, encore purement phénoménologiques donc, purent nouvellement gagner le statut de modèles.

Un autre déplacement doit être signalé ici : comme la physique n'était plus le nécessaire fondement de la représentation formelle, les modèles pouvaient encore plus radicalement se libérer de leur lien avec l'amont, avec la théorie, pour se déterminer parfois exclusivement selon l'aval et ses demandes spécifiques, ce qui favorisait en retour l'essor des fonctions de description ou de pure prédiction, de compression de données, de médiation entre discours, ou encore de modèles pour l'action.

La formalisation des modèles a par contrecoup également ouvert la voie à une pluralité de formalismes, donc à une liberté nouvelle à l'intérieur même des choix possibles en mathématiques. Aux modèles de nature matérielle, par comparaison, s'imposait un nombre plus restreint de natures spécifiques, tout au plus quatre, au début du 20^{ème} siècle : ils pouvaient être mécaniques, électriques, chimiques ou encore biologiques. Après le tournant formel, ils peuvent être géométriques, algébriques, analytiques, différentiels, intégrodifférentiels, statistiques, probabilistes (processus stochastiques), réticulaires (réseaux trophiques), à compartiments,

Franck Varenne

graphiques (théorie mathématique de graphes), topologiques (de topologie différentielle ou de topologie algébrique), etc.

Ainsi, la formalisation des modèles a permis une pluralisation des axiomatiques utilisées sans que soient toujours préférés par principe et sans discussions les formalismes jusque là majoritairement présents dans telle ou telle partie de la physique. Certains formalismes issus d'abord des sciences humaines - en statistiques exemplairement - ont ainsi pu migrer vers les modèles de la biologie et inversement sans nécessaire traduction intermédiaire dans un langage physicaliste.

À côté de cette pluralisation des axiomatiques a pu régner aussi et règne encore un *pluralisme de coexistence* entre modèles. Cela signifie qu'un même objet ou un même phénomène peut très bien être modélisé avec des formalismes différents et que cela ne conduit pas à une contradiction mais plutôt à une juxtaposition des modèles, à une coexistence pacifiée. On dit simplement que des aspects différents sont modélisés ou que des fonctions différentes en sont attendues. C'est devenu possible pour des modèles formels alors que si ces formalisations étaient encore considérées comme des lois ou des théories, cela aurait été bien plus difficile, du fait même de l'ambition épistémique unitaire, totalisante et exclusive qui accompagne en revanche aussi bien le concept de théorie que celui de loi.

3.2. Le tournant computationnel

Avec cette expression de « tournant computationnel », nous entendons désigner l'ensemble des modifications des pratiques de modélisation liées à l'émergence puis à l'essor du *computer*, c'est-à-dire de la machine numérique programmable de type Turing puis Von Neumann (avec stockage en mémoire des données et des programmes) comme on en voit partout de nos jours.

3.2.1. Quelques repères historiques

Dans les années 1950, on observe d'abord d'une part le développement de simulations numériques de modèles mathématiques. Ces modèles sont discrétisés et traités ensuite de manière itérée et approchée pour permettre leur résolution. Des techniques semblables de résolution par discrétisation existaient déjà auparavant, notamment au 19^{ème} siècle, en calcul des structures par exemple. Mais le computer en permet le traitement rapide et itéré.

Dans ces mêmes années, et même dès la fin des années 1940, se développent d'autre part les approches Monte Carlo, c'est-à-dire des approches de formalisation et de résolution de modèle formel présentant deux aspects essentiels mais différents : une approche centrée sur les individus et sur leur comportement individuel (neutrons, cellules, atomes, molécules, etc.), doublée d'une approche

recourant au hasard simulé (nombres pseudo-aléatoires) pour modéliser ce même comportement. Les techniques de dynamique moléculaire dites *ab initio* en seront issues, plus tard, en chimie. Elles seront nommées ainsi du fait de l'approche *bottom up* qui les caractérise.

Dans les années 1960-1980, à ces deux premiers types de simulation sur *computer* viennent s'ajouter des approches de modélisation et de simulation à fondement directement discret et à principe directement algorithmique : le *computer* - sa logique - devient ainsi lui-même l'inspirateur des formalismes et non seulement le simple outil qui les traite. La simulation se fait parfois ainsi à base de règles : on développe des modèles à grammaires génératives, des L-systèmes, des modèles logiques ou des modèles à automates de tous ordres. Ainsi en est-il des automates cellulaires, ces réseaux d'automates coexistant sur une grille, originellement proposés par Stanislaw Ulam. Ce déplacement de la logique de l'outil de traitement sur le formalisme traité lui-même a pour effet de solliciter, à leurs frontières, les mathématiques et de contribuer à augmenter encore le nombre des possibilités de formalisation, au-delà donc de la liste des classiques formalismes mathématiques.

Dans les années 1990, les langages de programmation continuent à diversifier leurs principes. Plusieurs langages apparaissent qui se révèlent toujours mieux adaptés à leur utilisation. Certains de ces langages se révèlent particulièrement efficaces dans la modélisation directe de systèmes complexes ou composites, cela parce qu'ils ne sont pas fondés sur une traduction préalable uniformisante de type mathématique ou logique. Ce sont les langages à programmation orientée objets. Le type de programmation qui les accompagne s'oppose à la programmation procédurale et impérative. Ils permettent la conception de modèle à base d'objets (informatiques) comme les systèmes multi-agents (SMA). À partir des années 1990, les modèles à SMA se développent considérablement en écologie, en sociologie, en économie, mais aussi en biologie du développement.

Depuis les années 2000, enfin, on peut dire que le tournant computationnel présente trois aspects majeurs : la pluralisation et la massification des flux de données, les nouvelles architectures de calcul, l'essor des techniques de simulation intégrative.

3.2.2. Ses conséquences

Une des conséquences du tournant computationnel, dont on a rappelé les multiples étapes et facettes, est que les simulations computationnelles qui, initialement, étaient au service des formalisations mathématiques se trouvent parfois dans la position hiérarchique inverse : ce sont de plus en plus les mathématiques qui sont au service de la simulation, de sa vérification, des identifications de ses paramètres, de sa calibration, du test de sa robustesse, etc.

Si bien que nous proposons de dire que ce tournant a pour principal effet de mener les modèles formels vers une étape nouvelle après celle d'un a-physicalisme, à savoir celle d'un *a-mathématisme*. Cela signifie qu'il n'est plus toujours besoin de concevoir préalablement tout modèle formel sous un format rigoureusement mathématique pour qu'il puisse être traitable ou utilisable par un computer, comme ce fut le cas à l'ère de la domination quasi-exclusive de langages de type FORTRAN (encore en usage cependant). On peut parfois concevoir un modèle computationnel direct, en se fondant sur l'ontologie formelle plus souple acceptée par le langage de programmation.

On assiste de fait à un essor des modèles formels dits « de simulation » (*simulation models*). Ces modèles favorisent les approches désagrégées et par individus et/ou par éléments le plus souvent spatialement situés. Les variables d'état y sont directement désagrégées au lieu d'être discrétisées après coup. On devrait alors plutôt les décrire désormais comme des simulations informatiques plutôt que comme des simulations numériques au sens étroit. Les approches de modélisation de type « modèles d'Ising » se multiplient et se diffusent au-delà de la physique du magnétisme. Dans ce type de modèle, rappelons qu'il s'agit de représenter explicitement les interactions de petits éléments au voisinage les uns des autres, interactions (magnétiques au départ) non toujours réductibles formellement par des moyens statistiques. Les approches lagrangiennes, par suivi de particules, sont de nouveau préférées aux approches eulériennes, par champs de vitesse. Les approches « Lego », brique par briques, semblent séduire de plus en plus de chercheurs pour la modélisation de dynamiques spatiales, de croissances ou de morphogénèses alors que leur principe même reste controversé selon les contextes. Le problème de la séparabilité des briques se pose crument, surtout pour la modélisation de systèmes vivants très intégrés comme un cerveau. Nous pouvons renvoyer ici à certaines des controverses internes au *Human Brain Project*. Il n'en demeure pas moins qu'une tendance forte existe : derrière les acronymes DEVS (Discrete Event System specification)¹², ABM (Agent-Based Models)¹³, IBM (Individual-Based Models)¹⁴, il s'agit toujours de favoriser une approche discrète (discontinue) dès le départ, au besoin en se fondant sur une représentation quasi-iconique des éléments du système cible comme de leurs interactions.

Pour le cas des conséquences du tournant précédent, nous avons dit qu'on avait observé une pluralisation des axiomatiques mathématiques à disposition des modèles formels. Pour ce qui concerne le tournant computationnel, cette pluralisation s'est encore renforcée en permettant que se développe de nouveaux formalismes mathématiques d'abord, mais pas seulement : ainsi par exemple de la géométrie discrète ou numérique utilisée intensivement par les modélisateurs 3D, de

¹² (Zeigler *et al.* 2000).

¹³ (Phan Amblard 2007).

¹⁴ (Grimm 1999).

l'analyse combinatoire ou encore de la théorie des processus de ramification stochastiques. Nous avons dit pluralisation mathématique, mais pas seulement : des formalismes plus proches du traitement logique ou sémantique que proprement mathématique (comme des logiques alternatives) ont vu le jour également.

Par ailleurs, ce pluralisme n'est plus uniquement de coexistence, il devient parfois, et de manière clairement inédite, un pluralisme d'intégration. C'est-à-dire qu'un même modèle ou un même système de modèles formels peut simultanément prendre en charge, grâce à l'infrastructure formelle du langage de programmation et grâce au programme, une pluralité d'axiomatics formelles¹⁵. Ce qui est souvent recherché pour la modélisation multi-échelles. Pris de nouveau à la racine de ce qu'il est, à savoir une Machine de Turing approchée, on redécouvre que le computer permet avant tout l'intrication pas à pas de sous-modèles mathématiques au cours même de la computation¹⁶. Historiquement, comme résultat de cela, on observe qu'une alternance constructive dans les stratégies de modélisation se manifeste dans un nombre croissant de domaines : on y observe en effet une alternance entre pratiques de démathématisation et de mise en simulation des systèmes cibles (simuler informatiquement d'abord), d'une part, et pratiques de remathématisation, *i.e.* de reformulation mathématique synthétique du modèle de simulation antérieur (modéliser mathématiquement ensuite)¹⁷. Si bien que de plus en plus de stratégies de modélisation cherchent à modéliser des simulations. Elles recherchent la simplification mathématique *ex post* de modèles de simulation déjà existants mais devenus trop lourds pour le traitement ou le développement.

Parmi les autres conséquences frappantes, on peut signaler qu'un accent est de plus en plus mis sur les ontologies au détriment des seules théories. Les ontologies (systèmes de spécification de concepts et de leurs interactions mutuelles) sont en effet plus souples et sont pour cela de plus en plus recherchées dans les premiers temps d'un travail de modélisation. Elles sont clarifiantes, plus directes et plus ergonomiques du point de vue de la reconnexion avec les concepts disciplinaires que des concepts directement théoriques, cela sans imposer d'entrée de jeu une dynamique contraignante dans le système de simulation. Car, avec l'étape « ontologie » venant avant ou même sans la théorisation, la dynamique globale du système de simulation est séparée de l'énonciation de ses concepts formels : elle est déléguée de fait au programme et à la computation.

¹⁵ (Varenne, 2007).

¹⁶ Paraphrasant Pascal qui disait qu'un peu de science éloigne de Dieu mais que beaucoup y ramène, on pourrait dire qu'un peu de langage évolué éloigne de la machine de Turing et de sa généricité radicale, mais qu'un surcroît de langage évolué y ramène.

¹⁷ (Varenne, 2007).

3.3. Bilan sur le siècle passé : les nouveaux sens du pluralisme

Formons un rapide bilan des acquis principaux du siècle passé en matière de modélisation. On observe d'abord un mouvement de dématérialisation des modèles qui deviennent d'abord majoritairement mathématiques. Ce mouvement de dématérialisation a pour effet de conduire à une diversification et à une pluralisation très nette des mathématiques utilisables et donc utilisées, ainsi qu'à une coexistence de faits entre de nombreux modèles de natures formelles chaque fois différentes.

Cette pluralisation s'est ensuite encore accentuée avec le tournant computationnel. Elle a été telle qu'elle en vient aujourd'hui à prendre un autre aspect dès lors qu'elle mène parfois les formalismes aux lisières des mathématiques. Avec le *computer*, on peut en effet développer des modèles formels qui sont au-delà ou si l'on préfère en-deçà de formalisations mathématiques bien fondées et mono-axiomatisées.

Cette pluralisation pourrait confiner à un éclatement des approches si elle n'était en même temps corrigée par un vaste mouvement de formalisation intégrative aidée par le *computer*. À la faveur de la mise à disposition de langages de programmation plus souples, les modèles sont parfois remplacés par des systèmes de modèles formels (multi-modèles) permettant la prise en charge computationnelle, *i.e.* donc par le *computer* et son langage, de modèles multi-aspects, multi-échelles, multi-physiques, multi-processus et donc finalement de modèles de simulation à visée principalement intégrative.

Une des conséquences, on l'aura compris, est la complexification du modèle à quoi engage ce type de modélisation. Dès lors, un certain nombre de questions semblent appelées à être radicalement renouvelées dans leur portée : quelles sont les conséquences de ces changements considérables sur les fonctions des modèles elles-mêmes, sur leurs dynamiques, sur leurs rapports réciproques, sur leurs incompatibilités, voire sur leurs conditionnements mutuels ? La dernière section proposera quelques suggestions en termes de constats et d'analyses.

4. Les rapports entre les fonctions des modèles à l'ère computationnelle

Nous évoquerons donc ici les conséquences des bouleversements récents que nous avons précédemment rapportés sur les rapports entre les fonctions des modèles. Nous le ferons en nous appuyant tour à tour sur chacune des trois interrogations majeures qui ont structuré le colloque « Modélisation : succès et limites » organisé par le CNRS et l'Académie des Technologies, en décembre 2016.

4.1. Faut-il toujours plus de puissance de calcul ?

4.1.1. Ce qui plaide pour davantage de puissance de calcul

Il faut d'abord comprendre que, dans les laboratoires comme dans les bureaux d'études, une solution computationnelle reste encore aujourd'hui souvent ce qu'elle a quasi-exclusivement été dès les années 1950 : une solution numérique. Une solution de traitement de modèle est numérique quand la discrétisation permet de remplacer une déduction formelle ou un calcul analytique non soluble par une numérisation suivie d'un grand nombre de computations pas à pas et effectuées à grande échelle, c'est-à-dire à un niveau inférieur à celui des variables d'état. Cet usage n'a jamais disparu, au contraire. Il s'est intensifié. Or, le nombre par unité de temps en est bien la clé. C'est pourquoi les usages du computer pour la conception et le traitement numérique de modèles formels n'ont jamais cessé d'exiger que des nombres toujours plus grands de nombres puissent être pris en compte et ce, avec des computations de plus en plus rapides. Une masse de calculs plus grande traitée en un temps plus court, c'est exactement la définition d'une augmentation de puissance de calcul.

Par ailleurs, avec ce que nous avons indiqué de la tendance plus récente - apparue sous l'effet du tournant computationnel - au développement parallèle des simulations multi-échelles, multi-physiques ou multi-aspects, il faut souligner que le nombre ne signifie plus uniquement la force brute de la répétition rapide et massive de computations simples sur des éléments ou des différences finis. Le nombre permet aussi d'aller dans le sens du « multi » et de l'intégration. Pour des automates cellulaires très vastes ou pour des systèmes multi-agents assez compliqués, la puissance de calcul reste aujourd'hui aussi une limitation importante, en particulier quand il s'agit de prendre en compte l'interaction non pas de plusieurs centaines mais de plusieurs milliers ou dizaines de milliers d'éléments : qu'on songe aux solutions de calcul en grille ou sur des processeurs graphiques, toujours plus utilisées. La puissance de calcul est donc favorable aussi à cette tendance à l'intégration qui a pu sembler pourtant, à ses débuts, aller dans le sens d'une économie de moyens computationnels.

Enfin, si l'on souhaite améliorer la réalisation des fonctions n°4 (analyse de données), n°5 (synthèse de données) ou n°7 (modèle phénoménologique, modèle prédictif) ou même encore la fonction n°19 ou 20 (modèle de décision ou d'action), la capacité à prendre en compte massivement des données elles-mêmes toujours plus massives est plus que jamais exigée et reste un facteur limitant important pour de futurs développements.

4.1.2. *Ce qui plaide pour moins de puissance de calcul*

En revanche si l'on cherche à faire assurer au modèle la fonction n°9 (compréhension), il peut être tout à fait contre-productif de s'appuyer sur le calcul massif et le tout-simulation. Il faut au contraire tâcher de maintenir une compréhension du fonctionnement général du modèle sur la base de paramètres qui eux-mêmes doivent conserver un sens, et donc une identifiabilité, dans le domaine disciplinaire à l'étude. Si tel n'est plus le cas, si par exemple notre stratégie de modélisation nous a malgré nous conduits à recourir à des paramétrisations *ad hoc*, il faut chercher à remodeler la simulation complexe en y retrouvant du sens. Il faut chercher à s'installer à une échelle méso et pas seulement micro. Il faut par exemple rechercher des faits stylisés ou, d'entrée de jeu, en partir¹⁸.

On pourrait également objecter que, même dans le cas où l'on veut ne faire assurer par le modèle que la fonction n°7 (description, prédiction, interpolation ou extrapolation), des problèmes de robustesse peuvent se présenter, en particulier si la formalisation du modèle amène à des non-linéarités. C'est-à-dire que le modèle peut être exagérément sensible aux légères variations de conditions initiales. Il devient alors difficile de l'utiliser sur le terrain, où l'estimation des conditions initiales restera approchée de fait, pour la fonction recherchée. Il faut donc davantage réfléchir aux formats même du modèle et à ses mécanismes plutôt que de ne faire confiance qu'à l'augmentation de la puissance de calcul pour résoudre ces problèmes de sensibilité, cela même si l'analyse de sensibilité recourt certes elle-même en amont à une forte puissance de calcul. La sensibilité à la forme du modèle (position d'un paramètre, type de traitement des échéances, des événements) doit aussi faire l'objet d'une réflexion approfondie car, avec une puissance de calcul non limitée, on peut toujours calibrer un modèle inutilisable ou absurde, comme on le rappelle souvent et à juste raison. Cette disponibilité d'une puissance de calcul bon marché peut inciter les chercheurs à ne plus nécessairement développer ces réflexions et à faire porter leur effort sur autre chose ; ce qui n'est pas souhaitable, on le comprend bien.

Une autre raison - fondamentale - pour laquelle la simple augmentation de la puissance de calcul n'est pas toujours désirable dans l'absolu est liée au fait que même si elle n'est pas au départ une fonction prioritairement recherchée dans une stratégie de modélisation, la fonction n°9 (compréhension) revient souvent et reste périodiquement demandée. Elle l'est en particulier dans les projets de modélisation de longue haleine, ne serait-ce justement que pour nous rendre toujours à même de trouver des solutions formelles alternatives face aux problèmes de robustesse éventuellement découverts par expérimentation numérique sur le modèle complexe initial. Mais la compréhension redevient périodiquement essentielle aussi pour des raisons techniques et pas seulement conceptuelles, même si ce point peut sembler

¹⁸ (Banos Sanders 2013).

paradoxal. Expliquons-le un peu mieux. Plusieurs enquêtes historiques sur de récents modèles de simulation intégratifs montrent qu'il y a des problèmes toujours plus fréquents aujourd'hui liés à l'ajout et à l'intégration de modules formels nouveaux dans les infrastructures de simulation complexes déjà existantes¹⁹. Pour résoudre ces problèmes, les chercheurs et développeurs ont périodiquement besoin de comprendre de nouveau - ou au moins de donner un sens stabilisé et vérifiable - à ce qui se passe aux interfaces informatiques entre les sous-modèles ou modules du système de simulation intégrative²⁰.

4.2. Modèles simples ou modèles complexes ?

4.2.1. Le constat d'un changement certain

On a compris, à partir des analyses précédentes, que le tournant computationnel s'accompagne d'un accroissement et d'une amélioration de l'*expressivité* des langages de programmation mais qu'il conduit, du même coup, à une diversification et une complexification des formalismes implémentables dans les programmes grâce à ces langages.

Comme conséquence de cela, un nouveau choix devient possible pour la modélisation, choix qui va en partie à l'encontre d'un discours épistémologique longtemps installé et dominant : le choix de la complexité. Ce choix de la complexité peut prendre plusieurs formes : soit on choisit de faire représenter au modèle plus de propriétés et donc on accroît sa représentation du détail en abaissant sa capacité d'idéalisation, soit on choisit de lui faire représenter simultanément des mécanismes plus nombreux, soit on choisit de lui faire représenter des mécanismes unitaires plus complexes en eux-mêmes (bouclages, couplages internes, couplages inter-niveaux, non-linéarités, etc.), soit encore on rend les mécanismes évolutifs et adaptatifs au cours de la computation et cela en informatique temps réel ou non. La récente querelle polie autour des approches KISS (Keep It Simple, Stupid!) *Vs.* KIDS (Keep It Descriptive, Stupid!) en sciences sociales computationnelles est représentative du déplacement et du renouvellement des options possibles en ce domaine²¹. Selon l'approche KIDS, en particulier, il n'est plus illégitime d'augmenter le nombre de paramètres mais on doit tout de même faire attention que chaque paramètre conserve une signification donc une valeur explicative directe.

¹⁹ En manière de boutade, on peut dire que, dans le cas de ces modèles de simulation complexe et intégratif, le computer a périodiquement « besoin de comprendre ce qu'il fait » (Varenne, 2007 : 151).

²⁰ Ce problème du « handshaking » entre sous-modèles est soulevé par (Winsberg 2006).

²¹ (Banos Sanders 2013) ; (Varenne 2010b).

Franck Varenne

Cette hésitation entre simplicité et complexité est ancienne et récurrente. On la tranche traditionnellement en se fondant sur des raisons de natures différentes. Nous proposerons ici une rapide classification de ces raisons afin de voir ce qui peut changer dans leurs pondérations relatives aujourd'hui.

4.2.2. Raisons de l'appel à la simplicité

4.2.2.1. Raisons métaphysiques

Une première raison métaphysique peut être dite ontologique. Elle s'inspire du rasoir d'Occam (14^{ème} siècle) selon lequel, dans l'enquête cognitive, il ne faut pas multiplier les êtres - donc ici les paramètres - sans nécessité car la nature est certainement économe, en soi. Elle ne fait rien en vain disait déjà Aristote.

Une seconde raison métaphysique repose sur l'hypothèse souvent soutenue de l'intelligibilité de principe de la nature, intelligibilité par les hommes ou plus exactement - on dirait aujourd'hui, - par des esprits humains non aidés ou non augmentés. Selon cette hypothèse, comme la nature doit être intelligible par l'esprit humain non aidé et que l'esprit humain ne peut traiter en même temps plus de 5 à 7 items, il doit donc, exister quelques mécanismes causaux *majoritaires* derrière chaque phénomène : on a donc toujours raison de chercher à négliger, idéaliser ou abstraire. Cette idée - qui n'est en fait qu'une hypothèse optimiste anthropocentrée - fut encore explicitement soutenue par Stuart Mill (1843) au sujet de l'explication causale, pourtant si problématique, en sciences humaines et sociales.

4.2.2.2. Raisons épistémiques

Une première raison épistémique - c'est-à-dire déterminée par la nature même de la connaissance cette fois-ci - consiste à dire que l'on doit toujours pouvoir continuer à comprendre ce que fait le modèle sinon dit-on souvent « la carte va être aussi complexe que le territoire » (allusion à une nouvelle de Borgès), ce qui est rejeté d'emblée comme inutile par l'opinion commune qui souvent confond allègrement les fonctions des modèles. Cette raison consiste donc à rendre la fonction n°9 (compréhension) absolument déterminante et toujours nécessaire pour toute modélisation, ce qui nous paraît aujourd'hui hautement contestable au regard des distinctions que nous avons proposées.

Une seconde raison épistémique tient à ce que Lenhard et Winsberg ont nommé le « holisme de confirmation »²² : trop d'intrications dans les modèles de simulation intégratifs empêchent aussi bien la corroboration décisive que la réfutation cruciale de tel ou tel sous-modèle. C'est un problème proche de celui qui été soulevé par

²² (Lenhard Winsberg 2010).

Pierre Duhem et Willard v. O. Quine. Mais on peut objecter que les techniques de validations croisées simultanées (*cross validations*) valables en particulier pour les modèles multi-échelles ou multi-aspects peuvent réduire considérablement ces effets systémiques et holistiques sans pour autant supposer que le modèle complexe ou composite développe une pure approche « Lego »²³.

4.2.2.3. Raisons techniques

Une première raison technique tient au fait qu'il faut éviter le surajustement (*over-fitting*) du fait de la sous-détermination des modèles par les données. Il faut donc au contraire rechercher plutôt des modèles simples parce que ce sont eux qui pourront proposer en même temps - si toutefois il en existe - une forme de généralité qui rendra la modèle robuste et utilisable assez largement.

Une seconde raison technique tient au fait qu'il peut être préférable de ne travailler que sur des modèles simples (au sens d'un modèle formel présentant un petit nombre de mécanismes éventuellement non linéaires) car c'est uniquement comme cela que l'on peut y maîtriser, en les comprenant en esprit, les émergences et les bifurcations ainsi que leurs effets.

4.2.3. Raisons de l'appel à la complexification

4.2.3.1. Raison épistémique

Une raison épistémique - cette fois-ci en faveur de la complexification - tient au fait que même pour faire assurer au modèle la fonction n°5 (synthèse de données) ou n°7 (reproduction virtuelle du terrain, reconstruction phénoménologique d'organisme ou d'organe complet en croissance, etc.), il peut être nécessaire de concevoir un modèle détaillé, plus fidèle en cela à l'hétérogénéité constitutive du terrain, ce niveau de détail ne pouvant pas toujours être commodément ni utilement resynthétisé par des formules mathématiques abrégatives et génératives. C'est le cas par exemple lorsque l'on couple une scène numérisée complexe ou même un SIG (un système d'information géographique) avec un modèle explicatif de comportement simple ou complexe pour les individus évoluant dans cette scène ou sur ce terrain virtuel.

4.2.3.2. Raisons techniques

Une première raison technique repose sur un constat fait à l'issue de certaines enquêtes historiques, comme nous l'avons déjà évoqué. Ces enquêtes montrent qu'il est parfois nécessaire aux modélisateurs de simuler de manière complexe un système

²³ (Varenne 2013).

Franck Varenne

cible lui-même complexe avant d'espérer pouvoir éventuellement le modéliser de façon élégante et ramassée conceptuellement²⁴.

Une deuxième raison technique réside dans le fait qu'une approche « Lego » est plus souvent possible qu'on ne le croit, en particulier lorsque les couplages ou les causalités descendantes et ascendantes sont faibles ou inexistantes. Quand on modélise un système compliqué parce que composite, on ne cherche pas forcément les non-linéarités et les émergences. Ainsi, il peut ne pas y en avoir du tout, comme c'est le cas de nombreux systèmes artificiels seulement compliqués, non complexes au sens strict²⁵.

Enfin une troisième raison peut résider dans le constat que, même si on se trouve face à des émergences inter-échelles, le modèle multi-échelles en question reste souvent calibrable par morceaux et ainsi contrôlable par des processus de validation soit séparés et locaux, soit encore simultanés et croisés²⁶.

4.3. La modélisation : vecteur de dialogue entre la recherche académique et l'industrie ?

La modélisation est-elle un promoteur d'expansion, de libération et de potentialisation mutuelle pour la recherche académique et l'industrie ou bien est-elle plutôt un facteur d'asservissement ? Dès les années 1960, la pratique de la modélisation a été régulièrement accusée de promouvoir un asservissement de la recherche académique aux objectifs de l'industrie²⁷. Une science qui ne procède plus que par modèles et qui semble renoncer par là aux théories présente pour certains le visage d'une connaissance dévoyée parce qu'irréremédiablement ciblée et intéressée, de fait déterminée par l'intérêt plutôt particulier que général. D'un autre côté, l'essor de la pratique de la modélisation dans les sciences, et pas seulement dans les techniques et dans les technologies, semble opportunément enseigner aux scientifiques une modestie épistémologique de bonne méthode, en même temps qu'une ouverture inédite - on l'a longuement décrite plus haut - à un pluralisme des possibles formels. Il y a donc à prendre des deux côtés. Le débat n'est pas aisé à trancher, on s'en doute. Nous ne pourrions là aussi que formuler quelques idées succinctes tant la question est considérable et ne peut être traitée en quelques lignes.

²⁴ (Varenne 2007).

²⁵ Un système est souvent dit complexe au sens strict quand il consiste en un grand nombre d'entités en interaction, dont le pattern résultant (propriété globale) n'est pas anticipable à partir de la seule connaissance des lois de comportements de chaque entité.

²⁶ (Moss Edmonds 2005) ; (Varenne 2013).

²⁷ Par des philosophes au premier chef.

4.3.1. *Évolutions dans l'ingénierie*

Rappelons d'abord très succinctement que la pratique de la modélisation est immémoriale dans les premières formes de l'ingénierie. Les historiens ont bien montré qu'on repère un recours très ancien aux modèles matériels, dès l'Antiquité au moins, cela pour résoudre des problèmes techniques relativement concrets, sur la base de maquettes ou de substituts matériels de tous ordres²⁸. Aux époques médiévales et modernes, les modèles matériels sont également employés à cette fin, en particulier rappelle Hélène Vérin, pour « assurer la monstration des effets »²⁹.

Quelles sont donc les nouveautés concernant les usages des modèles dans l'ingénierie contemporaine ? Une première nouveauté consiste dans l'amplification toujours plus considérable « pour la monstration des effets » justement des fonctions n°5 (modèles de données) et n°7 (modèles prédictifs) à la faveur du tournant formel puis du tournant computationnel.

L'essai de mécanismes possibles ou alternatifs a également été rendu bien moins cher et plus accessible aussi à partir de ces tournants : la fonction n°8 (explication) a été amplifiée et a de plus en plus permis de tester les objets conçus en amont de la conception matérielle des prototypes. Le prototypage formel puis computationnel a pu devenir la règle.

Une autre nouveauté tient au fait que cela est devenu aussi une affaire d'ingénieur et de modélisateur de savoir comment tordre les théories académiques formellement (par modèles) pour les rendre applicables (fonction n°14), pour les hybrider (fonction n°15) mais aussi pour décider parfois sans elles d'une action urgente (fonction n°20).

Concernant la conception d'objets, le tournant computationnel spécifiquement a permis des couplages inédits de fonctions des modèles. Prenons un seul exemple : il a permis entre autres un couplage de la fonction n°3 (expérimentation déléguée) et de la fonction n°6 (modèle conceptuel). Ainsi, l'ingénieur-modélisateur peut-il expérimenter directement sur des concepts ou sur des objets typés.

Les conséquences de ces évolutions sont importantes. On leur doit en particulier une diversification et une intensification des dimensions de dialogue constructif entre les méthodes académiques et les méthodes de recherche et de développement industriels. Les espaces d'expérimentations d'objets futurs ressemblent de plus en plus à des espaces de recherches de théorie ou de mécanismes explicatifs. C'est non seulement la conception mais aussi l'innovation qui est assistée par le computer

²⁸ Ian Hacking (Hacking 1983), après plusieurs anthropologues, a rappelé opportunément que la pratique préhistorique et antique de la modélisation n'était pas sans rapport aussi avec les différents usages de figurations, figurines ou effigies de tout type dans les religions : un modèle sert aussi à résoudre des problèmes d'ordre religieux ou esthétique, bien sûr, ne l'oublions pas.

²⁹ (Vérin 1993).

(IAO), en particulier sur la base des techniques de réalité virtuelle ou de réalité augmentée, mais pas seulement. Car les modèles de simulation intégratifs favorisent en outre les couplages de modèles à statuts épistémiques nettement différents : comme le couplage du prospectif et du descriptif, de l'évaluatif (ou du normatif) et du physiquement déterminé. C'est aujourd'hui souvent le cas pour un projet de design ou pour un projet urbanistique par exemple ou encore pour un projet de conception architecturale.

4.3.2. *Dialogues inter-disciplines et inter-champs*

On a décrit plus haut la convergence qui pouvait être réalisée, dans les modèles de simulation intégratifs, entre différents types de formalismes. Cette convergence, nous la décrivons comme agrégante plutôt que comme absorbante³⁰. Cela signifie qu'une telle convergence ne se fait plus au profit d'un seul formalisme auquel tous les autres devraient préalablement se réduire ou dans lequel les autres devraient se traduire. Cette possibilité, nouvelle dans la modélisation formelle, fait beaucoup pour rapprocher les techniques académiques de conceptualisation des techniques industrielles de conception. Aux interfaces multiples, on voit ainsi se développer un pluralisme d'intégration. La pluriformalisation de certains modèles complexes permet que des disciplines diverses (physiologie, génétique, physique, chimie) voire des champs divers (SHS, mathématiques et sciences formelles, sciences de la matière, sciences de la vie, sciences de l'ingénieur) collaborent sans que l'une de ces disciplines ou que l'un de ces champs soit nécessairement dominant ou impose une réduction préalable de tous les autres dans son langage et dans sa théorie.

Par ailleurs, l'ergonomie des nouveaux formalismes, dont ceux mobilisés préférentiellement par les approches de modélisation à agents ou individus-centrées, permet un regain de pertinence, de précision et d'efficacité dans les pratiques de modélisation d'accompagnement ou participative (fonctions des modèles n°16, 17, et 18). De nouveaux savoirs constitués, jusque là rétifs à la modélisation formelle, peuvent s'associer étroitement, et de manière cette fois-ci opérationnelle, aux sciences plus traditionnelles et par là démultiplier leurs prises sur le réel ou encore leurs angles d'analyse et leurs questionnements.

Enfin, il apparaît une complexité nouvelle, problématique, mais en elle-même féconde : c'est celle qui ressort de la combinaison des fonctions de connaissance des modèles. Ainsi, les fonctions de connaissance globales d'un modèle de simulation intégratif ne sont pas toujours déductibles trivialement des fonctions particulières de chacun des sous-modèles qui contribuent au modèle de simulation global. En particulier, il arrive que des modèles que l'on dit tirés des données (*data-driven*) soient couplés à des modèles tirés de concepts ou de théories (*concepts-driven*) : le produit final mêle des connaissances empiriques et des connaissances plus

³⁰ (Varenne 2007).

théoriques, mais toutefois pas pour les mêmes aspects ni pour les mêmes éléments du système cible. Le statut épistémique du modèle résultant reste donc problématique *a priori* si l'on n'en sait pas davantage sur les techniques de calibration employées ou sur les analyses de sensibilité, sensibilité aussi bien aux conditions initiales qu'à la variation des formes mêmes du modèle global.

5. Conclusion

Ce chapitre est parti d'un état des lieux classificatoire se concentrant principalement sur la variété - jugée grande mais toutefois assignable et compréhensible - des fonctions des modèles. Il s'est ensuite focalisé sur deux événements historiques majeurs intervenus dans les huit dernières décennies et ayant fortement affecté les pratiques de modélisation traditionnelles : le tournant formel et le tournant computationnel. Il a enfin tâché de donner quelque idée des conséquences de ces bouleversements quant à trois grandes questions de principes que nous pouvons soulever aujourd'hui concernant la modélisation, cela en restant attentifs aux développements différentiels des fonctions des modèles déjà exposées au début, comme à l'évolution de leurs relations mutuelles.

Au final, on peut dire que l'on constate une pluralisation mais aussi une interaction à la fois croissante et complexifiée des fonctions des modèles à l'ère computationnelle. À côté de la vague des données massives (*big data*) qui pose des problèmes épistémologiques d'un type proche mais différent, ce chapitre a essayé de montrer qu'il existe aujourd'hui des innovations méthodologiques décisives mais beaucoup moins médiatiques, qui se font à bas bruit donc. Il s'agit notamment de ce tricotage serré des fonctions rendu nouvellement possible par la modélisation et la simulation intégratives. On y repère une combinatoire complexe mais qui se révèle toutefois élucidable si l'on dispose des bons concepts. Cette combinatoire est telle qu'il paraît encore moins possible que par le passé de prétendre répondre unilatéralement et *a priori* aux questions de savoir ce qu'il faut préférer : l'augmentation de la puissance de calcul ou pas, un modèle simple ou pas, une recherche académique « pure » ou pas ?

Comme on le verra sans doute dans les autres chapitres de cet ouvrage, ces trois questions admettent des réponses variables selon les contextes et selon les fonctions des modèles prioritairement recherchées. Nous avons essayé de montrer que cette variabilité ne nous condamne toutefois pas à un relativisme complet des méthodes et des normes de la modélisation, mais qu'elle nous engage à un contextualisme informé doublé d'un perspectivisme explicite, tous deux conformes à la caractérisation du modèle que Minsky proposait dès 1965. Finalement, de toute cette enquête, il résulte cette idée que les méthodes de modélisation, au-delà de leur

Franck Varenne

diversité et de leur évolutivité, possèdent une complémentarité à la fois rationnelle et conceptuellement explicable. La méthode scientifique, y compris quand elle recourt au modèle, ne manque donc pas d'unité, même si cette unité n'est pas aussi évidemment ni médiatiquement perceptible que pour d'autres pratiques.

6. Bibliographie

Avertissement : cette bibliographie est une esquisse. Elle reste tout à fait sommaire au vu de l'ampleur du sujet qui n'a pu être ici qu'évoqué (histoire de la modélisation). Elle doit être complétée par les bibliographies des autres auteurs de cet ouvrage comme aussi par les bibliographies des ouvrages cités ci-dessous.

Aglietta, M., *Macroéconomie financière*, Paris, La Découverte, 2008.

Banos, A., Sanders, L., « Modéliser et simuler les systèmes spatiaux en géographie », *Modéliser & simuler. Épistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation – Tome 1, vol. 2*, Paris, Éditions Matériologiques, 2013, p. 839-869.

Delattre, P. & Thellier, M., *Elaboration et justification des modèles*, Paris, Maloine, 1979.

Grimm, V., “Ten years of individual-based modelling in ecology: what have we learned, and what could we learn in the future?”, *Ecological Modelling*, 1999, 115, p. 129–148.

Hacking, I., *Representing and Intervening*, Cambridge (UK, Cambridge University Press, 1983.

Kieken, H., « RAINS : Modéliser les pollutions atmosphériques pour la négociation internationale », *Revue d'histoire des sciences*, 2004, Tome 57, vol. 2, p. 379-408

Legay, J. M., *L'expérience et le modèle. Un discours sur la méthode*, Paris, INRA éditions, 1997.

Lenhard, J., Winsberg, E., “Holism, entrenchment, and the future of climate model pluralism”, *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 2010, 41, p. 253-262.

Levy, J.M. (dir.), *Les modèles, possibilités et limites*, Paris, Éditions Matériologiques, 2014.

MacKenzie, D. A., “Models of Markets: Finance theory and the historical sociology of arbitrage”, *Revue d'histoire des sciences*, 2004, Tome 57, vol. 2, 407-431

Minsky, M., “Matter, Mind and Models”, *Proc. of the IFIP Congress*, 1965, p. 45-49.

Moss S., Edmonds B., “Sociology and Simulation: Statistical and Qualitative Cross-Validation”, *American Journal of Sociology*, 2005, 110(4), p. 1095-1131.

Pavé, A., *Modélisation en biologie et en écologie*, Lyon, Aléas, 1994.

Phan D., Amblard, F., *Agent-based Modelling and Simulation in the Social and Human Sciences*, Oxford, The Bardwell Press, 2007.

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

Franck Varenne

- Varenne, F., *Formaliser le vivant : lois, théories, modèles ?*, Paris, Hermann, 2010.
- Varenne, F., « Les simulations computationnelles dans les sciences sociales », *Nouvelles Perspectives en Sciences Sociales*, 5 (2), 2010, p. 17-49.
- Varenne, F., "Chains of Reference in Computer Simulations", working paper publié par la FMSH, FMSH-WP-2013-51, GeWoP-4, 2013.
- Varenne, F., « Modèles et simulations dans l'enquête scientifique : variétés traditionnelles et mutations contemporaines », *Modéliser & simuler. Épistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation - Tome 1*, F. Varenne et M. Silberstein (dir.), Paris, Éditions Matériologiques, 2013, vol. 1, pp. 9-47.
- Varenne, F., « Épistémologie des modèles et des simulations : tour d'horizon et tendances », *Les modèles, possibilités et limites*, J.M. Levy (dir.), Paris, Éditions Matériologiques, 2014, pp. 13-46.
- Varenne, F., Silberstein M. (dir.), *Modéliser & simuler. Épistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation – Tome 1, vol. 1 & 2*, Paris, Éditions Matériologiques, 2013.
- Varenne, F., Silberstein M., Dutreuil, S., Huneman, P. (dir.), *Modéliser & simuler. Épistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation - Tome 2*, Paris, Éditions Matériologiques, 2014.
- Vérin, H., *La gloire des ingénieurs. L'intelligence technique du XVIème au XVIIIème siècle*, Paris, Albin Michel, 1993.
- Winsberg, E., "Handshaking Your Way to the Top: Simulation at the Nanoscale", *Philosophy of Science*, Vol. 73, No. 5, December 2006, p. 582-594.
- Zeigler, B. P., Praehofer, H., Kim Tag, G., *Theory of Modeling and Simulation. Integrating Discrete Event and Continuous Complex Dynamic Systems*, 2000, 2nd edition, New York, Academic Press.