



ELSEVIER



www.elsevier.com/locate/natsci

ARTICLE ORIGINAL

La simulation informatique face à la « méthode des modèles ». Le cas de la croissance des plantes [☆]

The computer simulation facing the “Method of Models”. The case of plant growth

Franck Varenne *

Doctorant en histoire des sciences (Lyon-2), 187, avenue du Maine, 75014 Paris, France

MOTS CLÉS

Modèle ;
Méthodologie ;
Simulation ;
Histoire ;
Croissance des plantes ;
Épistémologie

KEYWORDS

Model;
Methodology;
Simulation;
History;
Plant growth;
Epistemology

Résumé La perspective de ce texte est double : à la fois historique et épistémologique. L’auteur propose de situer les trois lieux de naissance de la « méthode des modèles » en biologie tels qu’ils peuvent aujourd’hui apparaître à l’historien des sciences. Cette diversité explique que différentes conceptions s’affrontent encore aujourd’hui derrière la façade de cette unique dénomination. Il montre, sur un cas particulier, comment le développement de la simulation informatique, actuellement en plein essor, tend à interroger et à réorganiser ce champ méthodologique. L’histoire de la modélisation de la croissance des plantes témoigne en effet des différents rapports qu’ont pu entretenir théorie, expérience, modélisation et simulation informatique lors des dernières décennies. Cela le conduit à remarquer qu’une pensée « graphique », représentative et extensive, tend actuellement à se substituer à une pensée naguère davantage tournée vers les processus continus, intensifs et fonctionnels.

© 2003 Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract The paper deals with an intellectual and historical approach to the changing meanings of the term “model” in life sciences. The author 1st tries to understand how modeling has gradually spread over life sciences then he particularly focus on the birth of mathematical modeling in this field. This quite new practice offers new insights on the old debate concerning the mathematization of life sciences. Nowadays, through computers, mathematics not only analyze or quantify but model things: what does it mean? The question turns out to be dramatic as far as digital simulation is concerned. That is the reason why he choosed to study a particular case: the history of the individual plant mathematical modeling. On this case, one may discern various epistemological standpoints that caused various reactions to the emergence of computer simulation, from the 50s to the 90s. The author shows that philosophical views often play a role in the history of sciences, especially in the choice of supposed proper mathematical formalisms. This will indicate that contemporary discourses tend to echo each other. That is the reason why he feels authorized to address the Foucault’s concept—*épistémè*—to denote these

[☆] Les réflexions présentées ici sont issues de travaux effectués dans le cadre d’une thèse d’histoire des sciences préparée sous la direction de G. Ramunni. Si l’on y trouve des erreurs ou des inexactitudes, la faute ne pourra bien sûr en être imputée qu’au seul signataire.

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : fvarenne@wanadoo.fr (F. Varenne).

convergences between the scientific and the philosophical discourses. Finally, it is suggested that this *épistémè* gradually is changing because one can currently observe the emergence of a “graphical” thought through these simulation experiments, which tends to replace a more functionalist thought.

© 2003 Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS. All rights reserved.

Cet article est une pièce dans la réflexion que NSS mène sur la modélisation. L’auteur s’attaque ici au concept de simulation et décrit les remaniements que son introduction induit dans l’*épistémologie* des modèles. Mise en cause par des philosophes qui n’y voyaient qu’un usage idéologique de la science, la méthode des modèles a été revalorisée par l’idée que ceux-ci n’étaient pas des représentations. Mais l’auteur montre que la simulation réintroduit la représentation, le « graphe », en un nouveau sens où l’espace devient constituant. À partir de l’exemple des modèles de croissance des plantes, il émet l’idée que la simulation fonctionne comme un méta-modèle intérateur de la modélisation, en faisant intervenir l’ordinateur non plus seulement comme machine à calculer, mais comme modèle. Ce panorama donne ses limites à la notion de représentation dans les sciences. - La Rédaction

Afin de faire clairement percevoir ce que nous concevons comme une conséquence épistémologique du développement de la simulation informatique dans et à côté de la méthode des modèles, nous procéderons en deux temps. Tout d’abord, dans une 1^{re} partie, nous rappellerons brièvement comment, de façon générale, la méthode des modèles s’est progressivement mise en place dans les sciences de l’environnement à partir du début du XX^e siècle. Puis, dans un deuxième temps et en référence au cadre plus étroit de la modélisation de la croissance des plantes, nous indiquerons l’émergence d’un modèle de simulation, ainsi que les changements conceptuels et épistémologiques qu’il a rendu possibles. La confrontation entre cette pratique récente et le contexte plus ancien et général de la méthode des modèles nous donnera la possibilité de réfléchir rétrospectivement sur l’évolution des rapports que n’ont cessé d’entretenir, dans l’histoire récente de la modélisation, connaissances théoriques, développements techniques et instrumentaux, options philosophiques, contextes sociologiques et institutionnels.

La méthode des modèles

L’histoire de la modélisation mathématique dans les sciences du vivant et de l’environnement est un domaine en plein essor et qui n’a donc pas encore atteint sa véritable maturité. Conscient du travail collectif qui reste à fournir, nous proposons néanmoins déjà ces quelques pistes de lecture telles qu’elles nous sont apparues au cours d’un travail accompli sur des archives particulières – dont la bibliographie rend partiellement compte – et à l’occasion de rencontres et d’entretiens avec quelques acteurs de cette histoire si complexe. Ces propositions restent bien entendu essentiellement révisables dans la mesure où, d’une part, les pratiques de modélisation continuent aujourd’hui à se diversifier et à se développer sous nos yeux – ce qui tendra certainement à donner à l’avenir d’autres perspectives à l’historien des modèles – et, d’autre part parce que nous sommes ici face à la difficulté redoutable, mais plus classique, de tenter d’écrire une histoire très contemporaine où l’objectivité peut être, en conséquence, soumise à rude épreuve.

Des modèles théoriques, statistiques puis cybernétiques à la « méthode des modèles »

Après cet avertissement, nous proposons donc l’idée qu’avec l’avènement de l’ordinateur dans les sciences du vivant, les mathématiques descriptives purent intervenir de plus en plus dans la production de modèles. C’est-à-dire que les mathématiques servirent davantage au titre d’outils de synthèse qu’au titre d’outils d’analyse, en pleine concurrence avec l’approche plus classique, notamment par équations différentielles¹. Plus précisément, avec le développement de l’instrument informati-

¹ Auparavant, il existait certes d’autres types de modèles : mendéliens, de génétique quantitative, matriciels, à compartiment, à L-systèmes, etc. Voir (Legay, 1997), pp. 24-34. Mais ces approches, même si elles n’étaient pas construites comme la mécanique analytique, s’astreignaient presque toutes au final à un *usage analytique* de la formalisation. Par exemple, dans un article très complet (Cheruy A., Gautier C., Pavé A., 1980), la simulation est présentée comme permettant surtout d’accéder aux paramètres internes du système réel. Le titre même de

que, la nécessité d'opter soit pour une approche empirico-inductive, soit pour une approche hypothético-déductive, est apparue de façon plus nette et plus crue que jamais : fallait-il faire de l'ordinateur une simple machine à extraire et traiter de l'information d'un ensemble complexe de données ou bien plutôt un support de modèles hypothétiques ? Si l'on choisissait l'approche par modèles, ces derniers risquaient alors de passer pour de véritables doubles simplifiés des phénomènes naturels et non plus seulement pour des outils d'expression formelle et abrégée du réel. On peut donc déjà le comprendre : l'ordinateur a imposé certains réaménagements épistémologiques au sujet de la mathématisation des sciences du vivant. Pour les mettre en lumière, il nous faut rappeler d'abord quels furent, selon nous, les trois lieux d'émergence de la méthode des modèles. Nous verrons alors dans quelle mesure ils furent porteurs d'options épistémologiques et techniques passablement différentes.

Le modèle théorético-mathématique

Au début du XX^e siècle, le concept transversal de population commence à être élaboré, tant en génétique qu'en physique statistique. Ainsi, en écologie des populations, le modèle par équations différentielles de Volterra peut encore se justifier par une référence à la physique statistique, puisqu'il est construit sur la « mécanique » des rencontres individuelles entre proies et prédateurs. À chaque individu « réel » est censé correspondre un individu mathématique, comme dans la construction des équations différentielles de la mécanique rationnelle. Cette modélisation ne s'autorise donc pas encore d'une simple analogie mathématique au niveau global, à la différence de ce qu'avait proposé un peu plus tôt Lotka². C'est en ce sens qu'elle a pu d'abord passer pour une modélisation théorique.

Le modèle empirico-statistique

En Angleterre, à la même époque, le deuxième foyer des modèles biologiques, à savoir la biométrie, prospère grâce au perfectionnement des outils statistiques. Cette approche empirique, sensible à la variabilité, part des données pour ensuite les traiter. Depuis les années 30, la méthodologie des plans d'expérience de R.-A. Fisher, essentiellement statistique d'inspiration, construit ce que

l'ATP/CNRS de 1980 — « Analyse des systèmes biologiques » — révèle en lui-même l'esprit largement analytique qui présidait à la pratique modélisatrice de l'époque.

² Kingsland (1995) a montré combien la justification qu'apporte Lotka pour ce même modèle est « systémique » avant l'heure et qu'elle avait donc dû attendre avant de recevoir quelques échos.

B. Fraassen (Van Fraassen, 1994) appelle des « modèles de données », c'est-à-dire une façon systématique de présenter ensemble des collections de mesures considérables et autrement intraitables. Cette approche prend ensuite son essor dans les années 50, notamment grâce aux premiers calculateurs numériques : des calculs statistiques fastidieux sont désormais envisageables.

L'expérience biologique entre alors dans une nouvelle ère puisque loin de faire violence à l'entrecroisement complexe des séries de causes et d'effets auquel sont naturellement sujets les êtres vivants — ce qui constituait la pierre d'achoppement de l'expérience en biologie, jusque là conçue comme un simple carrefour difficilement objectivable entre la vie du savant et celle de l'expérimenté (Canguilhem, 1965) — elle prend acte de cette essentielle incontrôlabilité pour la retourner à son profit. Dans cette redéfinition de l'expérience, le traitement informatique va prendre un poids considérable puisqu'il en devient l'indispensable, mais dangereuse, grille de lecture. D'où les mises en garde qui viendront plus tard (Legay, 1973, 1997). Par l'usage systématique des outils statistiques, les mathématiques ne servent plus seulement à quantifier des variables, mais aussi, et surtout, à réorganiser des observations complexes en des expérimentations résumées ou plus « lisibles », une fois présentées autrement. Ce nouvel usage des mathématiques ouvre alors la voie à deux interprétations épistémologiques possibles sur lesquelles nous reviendrons plus loin : soit le modèle statistique représente la réalité, soit il la filtre et n'en est qu'une grille de lecture et de questionnement.

Le modèle mathématique analogique

Par ailleurs, après la Deuxième guerre mondiale, de nouvelles tendances apparaissent, en grande partie dirigées contre l'approche purement empirique et statistique dont beaucoup critiquent la « pauvreté conceptuelle » (Bunge, 1968). Nous pensons qu'il faut voir là le troisième foyer de l'approche par modèles mathématiques en biologie. Ces nouveaux biologistes théoriciens, souvent venus de la physique, comme Rashevsky, critiquent alors l'inaptitude des modèles de données à fournir des explications proprement théoriques. Ils proposent une modélisation mathématique par analogie. Il ne s'agit plus de ramener un domaine phénoménologique à un autre, censé être plus fondamental, afin de mathématiser (comme auparavant la biophysique), mais de s'appuyer sur des isomorphismes pour transférer des méthodes mathématiques. Il s'agit donc de mathématiser sans pour autant en revenir à des modèles mécaniques.

Une des solutions paraît être dans l'élargissement de la causalité mécanique à celle de la rétroaction. Cette notion naît d'une double réflexion menée d'une part sur la notion d'homéostasie, issue de Cannon et d'autre part, sur le développement exponentiel des techniques d'automatismes mécaniques puis électriques. Elle a également sa source dans les travaux de neurophysiologie où l'analogie-identification entre les phénomènes nerveux et des flux électriques combinés semblait, depuis le siècle précédent, patente. La biologie moléculaire enfin avait déjà recours à elle. L'approche cybernétique a l'avantage de laïciser et de rendre présentable un finalisme depuis toujours latent et inévitable dans les sciences de la vie, d'où son succès. De plus, elle donne l'impression de posséder les moyens de réunifier les méthodes d'approche du vivant. Ainsi s'explique qu'à partir des années 50, cette approche finisse en fait par imposer l'introduction d'une troisième signification du mot modèle en biologie, à côté du modèle empirico-statistique et du modèle théorético-mathématique : la représentation par un système de régulation analogue. À la suite des travaux de Wiener, Pitts, McCulloch et Ashby, cette méthode prend la forme d'un « modèle des modèles », si l'on peut dire : le modèle cybernétique avec son enchevêtrement de boucles et son analogie hydraulique si intuitive et polyvalente. L'ordinateur peut être alors considéré ici comme davantage qu'un simple support du modèle ; en tant que machine cybernétique, il est lui-même modèle.

Dans les années 50-60, la situation épistémologique est donc devenue complexe. La méthode des modèles peut en effet se justifier de trois façons différentes qui sont respectivement issues des trois différents lieux de naissance que nous avons exposés :

- d'une part, procéder par modèles peut être conçu comme une *entreprise de théorisation* explicative. C'est le cas en dynamique des populations pour Volterra, puis en génétique, lorsque l'hypothèse des gènes sera avérée. En ce sens, le modèle ne semble donc pas pouvoir se départir d'un recours à une hypothèse réductionniste et physicaliste supposée en soutenir la crédibilité. Cette forme de modélisation témoigne d'un usage qui se veut « constitutif » des concepts mathématiques et pas seulement « régulateur », au sens de Kant. En effet, le concept mathématique n'est pas plaqué de l'extérieur. Il semble être au contraire le résultat d'une construction *in concreto* dans l'imagination et donc il peut passer pour véritablement légitime *a priori* ;

- d'autre part, modéliser peut être interprété comme le fait d'*expérimenter à travers un modèle*. Le modèle est alors pensé comme un outil servant à l'expérimentation complexe. Cette approche repose sur une vision essentiellement empirique ou, tout au moins, phénoméno-technique de la science : elle donne le beau rôle à l'expérience et demande à l'esprit de s'outiller pour refléter au mieux l'expérience et sa complexité. D'où, à l'époque, les admonestations de Bachelard (1951), Canguilhem (1963), Althusser (1967), Badiou (1969) et Legay (1973, 1997) visant à condamner toute interprétation du modèle comme représentation figurative : il ne faut pas prendre le modèle comme une image, une représentation ou une reconstitution de la réalité ;
- enfin, la construction matérielle ou la conception sur ordinateur de modèles formels de régulation tend à accréditer l'idée que l'on peut *expérimenter sur un modèle*, l'ordinateur permettant la réalisation. C'est ce que les Américains ont très tôt appelé une simulation, au sens large. Ce terme était déjà en usage en sciences de la vie dans les années 30 et désignait les résolutions de modèles mathématiques effectuées sur calculateurs analogiques. Dans cette même filiation, la simulation informatique désignera ensuite tout traitement pas à pas de formalismes complexes ou mixtes (mathématiques et informatiques) non solubles analytiquement. Or, devant les modèles cybernétiques, Canguilhem insistait également déjà sur le fait qu'il ne s'agissait que de simulations au sens premier, c'est-à-dire de simples imitations superficielles (1963). Il signalait le risque pour les scientifiques de retomber dans l'identification magique où le modèle serait à nouveau interprété comme représentation matérielle pouvant se substituer à la réalité.

Ces désaccords sur le sens de la mathématisation à l'aide de l'ordinateur vont alors alerter les biologistes, mais également les philosophes des sciences qui, se sentant investis d'une mission, ne vont pas hésiter à intervenir.

La méthode des modèles en question : l'intervention des philosophes

En effet, à la fin des années 60, lors des séminaires pluridisciplinaires de l'ENS d'Ulm, de vives attaques sont portées par les épistémologues marxistes français, comme Althusser et Badiou, contre la méthode des modèles. La modélisation est accusée de faire le lit du positivisme et donc de l'idéalisme philosophique. Pour montrer que les savants sont

pourvus d'une philosophie spontanée inconsciente, elle-même tiraillée entre un penchant idéaliste – mauvais car « extra-scientifique » et donc sujet aux « idéologies pratiques » de la classe dominante – et un penchant matérialiste – bon car « intra-scientifique » et « théorique » – Althusser écrit par exemple :

« Si on demandait [à ces physiciens et chimistes] de prendre alors la parole, il y a fort à parier qu'au petit groupe objet/théorie/méthode, ils substitueraient un autre petit groupe, beaucoup plus « moderne », où il serait question de « données de l'expérience », de « modèles » et de « techniques de validation » ou plus schématiquement : expérience/modèles/techniques [...]. Pour ne prendre que ce petit mot d'apparence innocent : « expérience » (ou « données de l'expérience »), il faut savoir qu'à la place qu'il occupe dans le deuxième groupement, il a en fait chassé un autre mot : objet extérieur matériellement existant. C'est à cette fin qu'il a été mis au pouvoir par Kant contre le matérialisme et remis en place par la philosophie empirio-criticiste dont nous avons parlé. Quand on met ainsi l'expérience (qui est, notez-le bien tout autre chose que l'expérimentation) au premier rang et quand on parle de modèles au lieu de théorie, on ne fait pas que changer deux mots : on provoque un glissement de sens, mieux, on recouvre un sens par un autre et on fait disparaître le 1^{er} sens, matérialiste, sous le deuxième, idéaliste » (Althusser, 1967, p. 104).

Althusser se dresse ainsi contre le « modélisme » en insérant les avertissements de Lénine et de Canguilhem dans une philosophie générale visant à décrire le développement de la science comme un processus de lutte dialectique incessante. La « méthode des modèles » serait le dernier avatar de l'indéfectible penchant de la science à idéaliser. En 1969, Badiou prolonge cette critique en la fondant sur les sources de la théorie mathématique des modèles. Les modèles économiques, linguistiques et cybernétiques sont accusés de refléter les objectifs de la classe dominante, dont notamment l'idéologie du libéralisme. Il écrit : « Pour l'épistémologie des modèles, la science n'est pas un procès de transformation pratique du réel, mais la fabrication d'une image plausible » (Badiou, 1969, p. 14). Or, la fabrication de cette image plausible (idéaliste) est déterminée par des intérêts de classe. Badiou s'assigne alors la tâche d'épurer la science du mauvais usage des modèles. En écho aux mises en garde de Bachelard contre le modèle image, qui fascine et fige la recherche (1951), Badiou pense que le

modèle doit être traité comme un adjuvant transitoire, destiné à son propre démantèlement mais qu'il ne doit pas être éradiqué, étant donné sa valeur heuristique indéniable. Althusser et Badiou s'accordent donc finalement sur le refus de considérer la science comme théorie contemplative et prétendument neutre. Ce faisant, ils n'autorisent que la seule interprétation du modèle comme outil affecté à une tâche pratique (expérimentale) bien précise.

Des scientifiques à l'école de l'épistémologie

À la même époque, du côté scientifique, la méthode des modèles est de toute façon victime de son succès : la profusion et la diversité des modèles participent à la dilution de leur crédibilité. Les chercheurs se demandent eux-mêmes ce qu'est devenue la méthode scientifique. Certains écologistes se penchent sur cette question épistémologique, car il ne leur semble plus que la science du vivant déploie une méthode unique, sauf justement cette méthode des modèles. Où se trouve l'unité et donc l'autorité de la méthode scientifique ?

En 1972, par exemple, l'écologue J.G. Skellam (1972) affirme que l'on peut résoudre ce problème en refusant les interprétations réalistes des modèles mathématiques. En prônant un nominalisme conscient (les modèles sont comme des noms : ils ne renferment pas les choses elles-mêmes ; ils ne sont que des manières de les indiquer), il affirme que la diversité des outils mathématiques déployés par les modèles, malgré les apparences, ne met pas en danger la relative unité de l'objet d'étude (Skellam, 1972). Chaque modèle n'est qu'une manière particulière de s'adresser à l'objet d'étude. En 1973, par un ouvrage influent, J.-M. Legay répond à ce même besoin général de clarification. Mais il va plus loin puisque, dans le contexte français, il fait implicitement droit aux critiques des néo-marxistes tout en maintenant la légitimité d'une approche par modèles contre ceux qui voudraient se cantonner à l'analyse statistique. Il propose ainsi une épistémologie de compromis dès lors qu'il s'agit également de ne pas céder au positivisme ou au nominalisme des anglo-saxons. L'enjeu y est de promouvoir les modèles en niant explicitement non seulement qu'ils soient des images réalistes, mais aussi et plus radicalement qu'ils servent à représenter les phénomènes : au contraire, ils servent à prolonger l'expérimentation sur les choses. Legay ne manque ainsi pas d'inscrire maintes fois l'avertissement qui deviendra classique en France contre l'usage du modèle comme représentation. Aussi, les modèles ne doivent-ils être conçus que comme

des outils pour l'expérience. Modéliser n'est plus une *theoria*, c'est-à-dire une contemplation fascinée et inactive, mais une *praxis*, une intervention sur le monde et sur les hommes.

Or, cette dernière thèse a accentué le rôle de ce que nous avons appelé le deuxième lieu de naissance de la modélisation biologique, celui du modèle empirico-statistique, au détriment de ce qui se jouait déjà dans les premiers développements de la modélisation par simulation, développements davantage issus de la modélisation mathématique, cybernétique et analogique (troisième lieu de naissance). En effet, au même moment, les usages de l'ordinateur ont considérablement évolué, notamment du fait des développements des périphériques : écrans, stations graphiques, imprimantes, mémoires... Cela a encouragé certains chercheurs à faire par ailleurs des sauts qualitatifs quant à l'idée qu'ils se faisaient de son usage. Ainsi l'ordinateur, de calculateur scientifique qu'il était, devenait une machine à traiter de l'information, pour devenir enfin, plus récemment encore, un simulateur [même si la simulation numérique avait été dès le départ, en sciences physiques, contemporaine de la naissance de l'ordinateur numérique, notamment avec les travaux de Neumann et Ulam : voir (Galison, 1997)]. Or, en occultant cette dernière évolution, ces philosophes et scientifiques ont préféré continuer de refuser à la science l'usage du modèle représentation. En France, dans le contexte des sciences du vivant, cette thèse a eu pour effet de marginaliser la simulation numérique en lui conférant soit le rôle d'une imitation superficielle des phénomènes, juste bonne pour les positivistes (taxés d'idolâtrie, de fétichisme ou d'idéalisme par les marxistes), soit le rôle d'une technique de résolution approchée des modèles mathématiques complexes. En effet, nombre d'écologues et de biologistes vont par la suite se référer à l'ouvrage de synthèse de Legay sur la question, dans la mesure où il légitime adroitement le travail scientifique de modélisation mathématique tout en répondant aux critiques des philosophes, aux demandes spécifiques de la recherche de l'époque et aux normes de l'esprit du temps. Rétrospectivement, il nous est par ailleurs tout à fait possible de comprendre la position de Legay dans la mesure où il y avait encore fort à faire, à l'époque, pour que la « méthode des modèles » soit au moins reconnue, si ce n'est adoptée, par les chercheurs.

Quoi qu'il en soit, une des conséquences de ces réexamens épistémologiques sera l'exclusion programmatique de tout recours à un modèle général, complexe et polyvalent. Le modèle sera longtemps pensé comme valant seulement pour un objectif précis. N'étant pas une représentation mais seule-

ment un outil, il ne pourra être qu'une réponse précise à une question précise. Il vaudra à l'œuvre et non comme représentation. Ces dernières années, et par contraste, cette restriction tend à être bien moins prégnante. Une évolution nette semble se produire vers la réintégration des couplages de modèles et la modélisation complexe de systèmes complexes (Lévêque, 2001). Nous pensons que cela est principalement dû aux relatifs succès de la simulation informatique.

La modélisation de la croissance des plantes

De la physico-chimie à la structure géométrique de la plante

Poursuivons cet historique afin de tester cette dernière hypothèse en nous laissant guider cette fois par un cas plus particulier : celui de la modélisation de la croissance de la plante individuelle. De façon surprenante, après la guerre, il subsiste à ce sujet, un consensus assez manifeste en ce qui concerne l'approche à adopter, quelles que soient les options épistémologiques déclarées. L'approche biophysique de Rashevsky (1948), par exemple, s'appuie sur les processus physico-chimiques. Il s'agit de modéliser mathématiquement le fonctionnement physiologique de la plante. L'accent est donc mis sur les flux de sève : la métaphore hydraulique et mécanique est ici patente. En 1971, Legay reprend ce modèle en le précisant et en l'adaptant à la mise en place de l'architecture du gui. Mais il le fait dans une approche typiquement biométrique (Legay, 1971). Il confirme et précise la formulation de Rashevsky. On assiste alors à un accord bien surprenant entre le modélisme représentatif – ou qui tendait à l'être – et le modélisme pragmatique et anti-représentatif. En fait, la biologie mathématique et la biométrie ont certes deux traditions relativement opposées et deux programmes explicites différents quant à la *méthode*, mais les deux s'accordent néanmoins implicitement et plus profondément sur l'*objet* auquel doit s'appliquer le mot modèle : le fonctionnement de la plante. Le modèle est donc pensé comme fonctionnel avant tout. Il repose sur des considérations de viabilité métabolique et mécanique de la plante en fonctionnement stationnaire. Dans les deux approches, la plante est pensée à l'image d'une usine hydraulique ou physico-chimique : elle « fonctionne » comme une usine, avec des entrées, des sorties, des flux et des stocks d'énergies et de substances variées. La modélisation de la forme n'y est pas

oubliée, mais elle est subordonnée à la modélisation du fonctionnement³.

Une reconduction du vitalisme

Réfléchissons ici quelques instants à la conséquence épistémologique de ce fait, avant de revenir au cas de la plante : dans l'*épistémè*⁴ de l'époque, la biométrie et la biologie théorique partagent en effet ce primat du « fonctionnement » avec l'économisme libéral bien sûr (modèles de J. Forrester), mais aussi avec la philosophie néo-marxiste elle-même, à commencer justement par la philosophie des sciences françaises⁵. Bachelard puis Althusser font ainsi « fonctionner » la philosophie afin qu'elle pratique le monde et la science et les transforme comme une machine thermodynamique transforme la chaleur en travail. Dans le cas des sciences du vivant, ce discours s'autorise du matérialisme dialectique et remonte en fait à la philosophie de la nature de Engels (1876), Lénine (1908) ou plus récemment, de Prenant (1935), Haldane (1946) ou Teissier (1946). Il va de pair avec une vision dialectique de la matière comme de la vie. Derrière ce mot « dialectique », sans doute rarement porté par un réel socle philosophique (c'est la raison pour laquelle on ne peut d'ailleurs parler d'une vision commune du monde), il s'agit en fait simplement, pour nombre de scientifiques des années 30 et de l'après-guerre, d'affirmer que la nature est infiniment profonde, complexe, en devenir et qu'elle n'est pas construite par l'homme. À l'inverse, les produits figés de l'homme manquent de cette vie et de cette profondeur : c'est ce qui les oppose radicalement à la chose naturelle. En tant que produits du travail humain, les modèles sont donc eux aussi, à l'instar des produits de l'artisan

³ Il serait sans doute absurde d'opposer strictement la forme au fonctionnement. Mais peut-être est-ce dans un certain *renoncement*, dans un certain refus de modéliser immédiatement les deux ensemble que la simulation tire l'origine des avancées qu'elle permet.

⁴ Nous reprenons cette terminologie au philosophe M. Foucault. Chez lui, le terme *épistémè* désigne « l'ensemble des relations pouvant unir, à une époque donnée, les pratiques discursives qui donnent lieu à des figures épistémologiques, à des sciences, éventuellement à des systèmes formalisés... », in Foucault (1969 : p. 250). Dans le cadre restreint de cet article, il s'agit donc uniquement pour nous de signaler ces quelques échos troublants entre science et philosophie, sans prétendre évoquer ce-faisant toute une vision commune du monde à cette époque. Il nous paraît en effet douteux qu'une telle vision du monde existe.

⁵ D'où l'idée qu'il subsiste ici un « esprit du temps » déterminant conjointement l'évolution de postures par ailleurs franchement opposées, non seulement d'un point de vue technique, mais aussi idéologique et politique.

ou de la manufacture, finis, simples et transparents au regard de l'intellect, c'est-à-dire essentiellement compréhensibles et maniables par la pensée⁶ : d'où le fait qu'utiliser les modèles en positiviste consisterait à se rendre coupable d'idolâtrie. Il faut noter que cette *épistémè* « fonctionnaliste » des années 30-70 (qui permet donc d'utiliser les mêmes modèles que les anglo-saxons tout en se défendant de tout fétichisme positiviste) déborde les limites mêmes du marxisme puisque la cosmologie spirituelle de Teilhard de Chardin (1955) développera une semblable approche, à tel point que la systémique tardive des années 70 pourra indifféremment se réclamer du marxisme ou du teilhardisme (Rosnay, 1975). Il est ainsi possible de concevoir le large déploiement du matérialisme dialectique dans l'épistémologie des sciences du vivant de l'après-guerre comme une simple reconduction du vitalisme d'avant-guerre, mais sous une forme matérialiste parce que plus recevable par l'esprit du temps : il s'agirait là d'un cas de déplacement conceptuel opportuniste manifestant la remarquable persistance d'une posture ontologique par ailleurs sous-jacente au travail de modélisation du vivant.

Comment modéliser une croissance végétale ?

D'un point de vue scientifique, cependant, il subsiste un problème précis : comment, avec un tel usage des modèles mathématiques, modéliser la croissance des structures spatiales de la plante ? Tant que l'embryologie et la morphologie physiologiques seront encore dans les limbes, l'approche par le fonctionnement n'empêche-t-elle pas la modélisation précise de la croissance ? En effet, la modélisation par compartiments, si elle prend bien en charge les hétérogénéités structurelles de l'organisme, ne va pas jusqu'à permettre la description et la prévision de sa forme spatiale. Assez paradoxalement, en cette époque structuraliste (années 60-70), le terme « structure » renvoie rarement à une organisation spatiale concrète et sert le plus souvent, au contraire, à l'escamoter, puisqu'elle s'autorise davantage de la métaphore linguistique et donc de la linéarité de la phrase, comme de l'équation mathématique close. Pour la plante, si l'on veut intégrer l'espace, la solution est peut-être alors dans les mathématiques pures ou bien dans le mariage entre la thermodynamique et la géométrie.

⁶ C'est précisément ce qui est devenu contestable à l'ère de la simulation informatique.

La solution de l'approche théorique et *a priori*

De nombreux modèles théoriques de la croissance ramifiée des plantes ont donc été proposés dans les années 70-80. Ceux-ci pouvaient tout autant s'inspirer d'une approche topologique et qualitative comme celle de R. Thom ou bien fractale comme celle de Mandelbrot ou bien encore thermodynamique. Ici, nous ne dirons quelques mots que sur le cas des modèles de R. Jean (1978). Ils sont remarquables en ce qu'ils manifestent clairement l'objectif (commun à toutes ces approches *a priori*) de concilier, dans un formalisme thermodynamique, la modélisation de la croissance de la plante avec celle de son fonctionnement. Cette conciliation a en effet toujours été la pierre d'achoppement de l'embryologie moderne. La méthode préconisée par R. Jean consiste donc à considérer la plante en fonctionnement, mais en lui adjoignant un principe d'*extremum* thermodynamique qui permet également au modèle de spécifier de façon univoque à chaque pas la croissance de la plante et l'ajout d'une structure : un bourgeon, etc. L'hypothèse biophysique est donc ici la suivante : la croissance se fait toujours dans la direction d'une optimisation du fonctionnement physico-chimique de la plante ; on ne doit pas séparer la modélisation de la croissance de la modélisation du fonctionnement. Inutile de préciser que ces modèles, malgré leur attrait esthétique, n'ont pu passer au stade opérationnel (car n'étant pas précisément calibrables) et ont donc principalement été étudiés au niveau théorique.

Une approche pragmatique : les travaux de Reffye et de l'Atelier de Modélisation de l'Architecture des Plantes (AMAP/CIRAD)

Dans un tout autre contexte, pour l'ingénieur agronome P. de Reffye, en poste à l'IFCC dans les

années 70, la seule solution au problème pragmatique qu'il se pose (estimer à l'avance la production fruitière des caféiers) semble être de faire imiter docilement et précisément la genèse de la plante par l'ordinateur (voir l'Encadré 1). Le modèle construit donc une *maquette virtuelle* tridimensionnelle. Par surcroît, il permet de dessiner de belles images très réalistes. Il est donc d'abord le récit non interprété de l'inscription d'une structure dans l'espace trivial. Il reprend les données descriptives mais significatives de la botanique (entre-nœuds, unité de croissance, etc.) et les quantifie empiriquement.

Or, il est remarquable que ce modèle de simulation botaniquement réaliste soit né tout à fait en dehors des méthodes classiques des modèles mises en œuvre dans les sciences du vivant et en particulier en écophysiologie : son auteur s'est principalement inspiré des méthodes descriptives de la recherche opérationnelle. Le modèle de la plante y est un ensemble de processus stochastiques (les bourgeons) s'engendrant les uns les autres. La plante n'est donc plus d'abord une usine, ni même une machine obéissant à un quelconque principe d'optimalité, qu'il soit physiologique, écophysiologique, topologique, thermodynamique ou informationnel. Elle ne remplit pas d'abord une fonction. Elle n'est pas un processus énergétique ou informationnel. Elle déploie des formes spatiales triviales. Elle est avant tout une architecture se déployant dans l'espace tridimensionnel habituel et non dans un espace abstrait : espace des phases, topologique ou autre (voir les Figs. 1, 2). Par la suite, les développements d'Amap ont bénéficié des avancées conceptuelles qui sont intervenues en 1970 dans la botanique descriptive, notamment avec l'introduction par F. Hallé et R.O. Oldeman du concept de « modèle architectural ». Dans cette expression, le terme de « modèle » désigne un style particulier de croissance aboutissant à un type particulier de port pour un arbre donné. Le « modèle » est la description stylisée de la mise en place d'une

Encadré 1. Le logiciel de Ph. de Reffye

Dans le premier logiciel que de Reffye (1979) a conçu pour sa thèse, les lois stochastiques des bourgeonnements, des ramifications ou des entre nœuds sont relevées précisément sur les plantes réelles : on compte, on mesure et on construit des histogrammes en fonction de l'ordre des entre nœuds (Reffye, 1979). Ainsi on peut remonter aux lois de probabilité de ramification, de pause ou de mort, pour un ordre donné de ramification. Ces lois de probabilités sont ensuite simulées sur l'ordinateur par tirages de nombres aléatoires. Le modèle de simulation est ainsi le *générateur logico mathématique* d'une forme spatiale aléatoire (visible sur écran informatique) visuellement similaire à celle de l'organisme réel. Au départ, son approche n'a donc pas de prétention théorique. Elle se présente comme empirico-descriptive.



Figure 1 Caféier (cultivé sur deux tiges) simulé par le logiciel AMAPsim. Image aimablement communiquée par Ph. de Reffye.



Figure 2 Caféier en fleur simulé avec le logiciel AMAPsim. Image aimablement communiquée par Ph. de Reffye.

architecture végétale. Or, précisément, Amap permet de quantifier et de rendre opérationnels après coup ces concepts botaniques. L'émergence d'Amap peut donc être interprétée comme une rencontre entre une interrogation pragmatique, des développements technologiques (informati-

ques) et un progrès conceptuel dans la discipline descriptive concernée. On peut comprendre cela comme une revanche de l'anatomique sur le physiologique, du morphologique discret sur le processuel continu. Dans le vieux débat sur la priorité de la structure ou de la fonction en biologie, la simulation informatique semblerait donc inciter, pour l'heure, à la prise en compte prioritaire de la structure spatiale concrète. Or, dans ce cas précis, modéliser signifie à nouveau et avant tout, représenter.

Dans le cas d'Amap, la mathématisation *via* l'informatique ne sert donc pas à résumer, ni à emprunter des raccourcis expressifs pour dire la nature, comme elle sera, avant qu'elle ne le soit effectivement. Elle sert à réciter « intégralement » la nature, quoique plus vite, bien sûr : cela suffit pour prédire. La croissance de la plante est conçue, mesurée et modélisée graphiquement : c'est donc une « pensée graphique » qui préside ici à l'élaboration du modèle. Cette pensée travaille à mettre en scène fidèlement l'espace et ses jeux, en se limitant d'abord aux juxtapositions, à ce que les philosophes appelèrent le *partes extra partes*. Elle se distingue d'une pensée que nous proposons d'appeler « processuelle », où prédomine une sensibilité à la temporalité, ses flux et ses recouvrements, comme ce fut notamment encore le cas tant dans les sciences du vivant que dans les discours philosophiques entre 1950 et 1980, sauf exception (Dagognet, 1973). La simulation par ordinateur autorise cette pensée graphique car d'une part, elle pallie la faiblesse de notre imagination rapidement unilinéaire, ainsi que celle de nos quelques outils mathématiques calculables, d'autre part, parce qu'elle permet (avec les nombres pseudo-aléatoires) de simuler des événements, des surgissements, sans qu'il soit besoin de les rapporter précisément au passé. Le modèle non seulement n'est plus minimal, mais il redevient représentatif de ce qu'il modélise. C'est pourquoi, à la différence de F. Dagognet, nous pensons que, dans ses représentations, la science n'a plus pour seul but ni pour seul moyen de compresser des données (voir Encadré 2). Le modèle ne transfigure pas toujours son objet en l'abrégeant car, avec la simulation informatique, le signifiant (l'image virtuelle réaliste) conserve une ressemblance avec le signifié (l'arbre réel). Modéliser n'est donc pas toujours simplifier ni condenser. Cela ne signifie pas, bien sûr, que la simulation annule les autres formes de modélisation dont nous avons parlé, mais qu'elle s'inscrit en porte-à-faux par rapport à elles et qu'on ne peut plus simplement la définir dans les termes qui valaient pour celles-là.

Encadré 2. La philosophie de la simulation

Même si cela justifierait une étude historique en soi, on peut dire qu'en France, depuis les années 80 et malgré de nombreux travaux, la simulation informatique n'a pas donné lieu à des suggestions épistémologiques qui permettraient de la penser comme autre chose que comme une simple prolongation opérationnelle de la modélisation mathématique ou que comme un récit, c'est-à-dire comme la réalisation dynamique singulière d'un modèle mathématique, qu'il soit fictif ou non. Elle est donc souvent conçue comme un « outil heuristique » sans plus de précisions ou comme une « néo écriture », un système de signes nouveaux, une narration fictive. Pensée en référence au modèle mathématique fonctionnel, elle est donc toujours évaluée à l'aune du modèle et de son pouvoir généralisant et abstraitif : un pouvoir *linguistique*. La simulation aurait ainsi pour fonction de nous rapprocher de l'empirique singulier en rentrant dans le détail d'un « dire » général (le modèle), mais pas de se substituer à cet empirique : ne confondons pas le signe (avec son fameux arbitraire) et la chose ! Or la science actuelle semble donner de nombreux exemples de cette substitution effective puisqu'on s'y livre à des expérimentations virtuelles. Sauf exception (Lévy P., 1987 et 1990), dans tous les cas de figure évoqués, il s'agit toujours malgré tout de penser la simulation dans une *identification au langage*, à ses synthèses, à ses jeux pragmatiques (l'étude sociologique et pragmatique des modèles se développe aujourd'hui), à son arbitraire, à ses déplacements, à ses métaphores, à ses fictions, à ses récits, bref, à sa *temporalité* essentielle. Pour notre part, sans nier l'intérêt de ces lectures linguistiques et dialectiques, nous suggérons que la nouveauté de la simulation réside aussi dans sa possible prise en compte de l'espace et de ses événements éparés, d'où notre qualification de « graphique ». Ce terme présente, il est vrai, l'inconvénient de renvoyer quand même étymologiquement à l'écriture. Les références philosophiques françaises sur ces questions sont P. Quéau (1986 et 1994), P. Lévy (ibid), P. Livet (1991), G. Chazal (1994), I. Stengers (1997), N. Bouleau (1999), G. G. Granger (2000), D. Parrochia (2000), A. Barberousse et P. Ludwig (2000), P. Nouvel (2002). Pour des références plus nombreuses et plus larges, notamment anglo saxonnes, sur la question de la simulation, voir Varenne, 2001, 2003a et 2003b.

Certes, de nombreux philosophes et scientifiques ont constaté depuis plusieurs années le retour d'un intérêt pour la forme et pour l'espace dans les sciences contemporaines et en philosophie. Mais, en général, ces réflexions s'autorisent des développements en topologie ou en théorie des fractales. Sans nier l'intérêt de ces travaux, nous croyons que ces lectures sont encore tributaires d'une vision processuelle. Or la botanique, de son côté, modélise l'espace avec succès en recourant à des mathématiques descriptives relativement simples et dont la clé semble résider dans une pensée de la juxtaposition et de l'événement spatial pur⁷ se faisant très tôt aider par l'ordinateur, sans que celui-ci n'en devienne pour autant une simple machine à calculer.

La force de cette approche est qu'elle semble pouvoir absorber, par la suite, le fonctionnement

qu'elle a d'abord délaissé pour un temps. Les modèles de fonctionnement y semblent en effet assez aisément intégrables. La simulation joue alors le rôle de méta-modèle universel et intégrateur (Bouchon, 1995). Dès lors, prévoir les productions en bois ou en fruits par la simulation architecturale devient envisageable. Il devient de même possible de simuler des forêts virtuelles architecturalement réalistes (voir la Fig. 3) pour « expliquer » des images satellites. La simulation permet, dans ce cas, de résoudre des problèmes dits inverses, autrement non calculables. Descriptive à une certaine échelle, cette approche en devient donc explicative à une autre. L'opposition classique entre modèle descriptif et modèle explicatif devient toute relative, on le voit. En simulant la croissance des plantes, les modèles d'Amap permettent d'expliquer des phénomènes à une autre échelle. En un sens, ils « expliquent » la croissance des forêts ou les transferts radiatifs et ils « interprètent » les images de la télédétection, puisqu'ils permettent le traitement de problèmes insolubles mathématiquement.

⁷ De par les – mal-nommés – « processus » stochastiques de naissance et de mort.



Figure 3 Pins simulés par le logiciel AMAPSim (image disponible sur www.cirad.fr/presentation/programmes/amap/themes/bota.shtml).

Conclusion

Pour finir, nous pouvons nous livrer à deux types d'observations : d'abord historiques puis épistémologiques.

Tout d'abord, l'histoire complexe de la modélisation, à peine esquissée ici, montre combien des facteurs hétérogènes y sont toujours entrelacés : facteurs institutionnels, académiques, scientifiques, techniques, instrumentaux, sociaux et philosophiques. Il serait donc vain de vouloir déceler, dans ce type d'histoire des sciences, aussi bien des filiations absolument continues que des ruptures radicales de paradigmes. Les divers facteurs que nous avons cités s'intercalent (pour reprendre une expression de l'historien Peter Galison) en ce qu'ils sont étroitement reliés, mais aussi en ce qu'ils sont relativement autonomes et qu'ils ne se développent donc pas au même rythme. C'est cela qui donne lieu à des « naissances » de nouvelles solutions techniques sous l'effet de rencontres sporadiques entre ces évolutions intercalées. Nous croyons ainsi que la « naissance » de la simulation informatique de la croissance des plantes constitue une illustration de ce type de « rencontre » entre facteurs hétérogènes dont l'histoire est riche : cette technique ne semble pas en effet avoir pris racine dans la traditionnelle « méthode des modèles » appliquée au vivant du fait des options épistémologiques, voire ontologiques, qu'une telle méthode colportait, mais la simulation a tout de même été possible dans un cadre pragmatique autonome (agronomique) de par l'accélération des développements d'un instrument et des ses périphériques

nouvellement à disposition : l'ordinateur. En retour, elle contribue aujourd'hui à faire évoluer certaines options épistémologiques normatives en écologie et foresterie.

Ensuite, l'évocation de l'histoire complexe de la modélisation mathématique permet aussi de mieux comprendre la diversité actuelle des options épistémologiques à l'œuvre dans les débats sur la modélisation. Entre autres problèmes sous-jacents, on voit par exemple souvent revenir la question de savoir si un modèle doit d'abord avoir un rôle théorique ou un rôle empirique, si pratiquer des expérimentations à *travers un modèle* revient à expérimenter *sur un modèle*. De notre parcours, nous pouvons également tirer une deuxième remarque de nature épistémologique : le modèle, en botanique et en agronomie, n'est plus systématiquement minimal ou fonctionnel. Il peut être descriptif et concerner l'organisme dans sa globalité ; ainsi, il imite et intègre un maximum d'interactions locales afin de prédire le comportement global. Il prend alors en compte prioritairement la structuration spatiale du phénomène dynamique, avant même son fonctionnement. Nous voyons là une évolution dans l'*épistémè* contemporaine qui irait du primat du processuel vers celui du graphique et pas seulement du « global » au « local », ou de la « variable agrégée » à « l'agent individuel », ou même du « continu » au « discret ». La pensée, naguère prioritairement sensible aux involutions et évolutions continues de la matière vivante, à sa dialectique (au sens large), deviendrait, à l'âge de la représentation numérique, une pensée « graphique », aujourd'hui encore en gestation. Dans les sciences du vivant, la nouvelle alliance ne serait donc pas uniquement à conclure avec la temporalité mais aussi et surtout avec la spatialité. D'autres travaux, comme ceux de Hill et Coquillard (1997), semblent en effet aller dans le même sens. C'est donc par une espèce d'ironie de l'histoire qu'avec la simulation orientée vers le graphique, on assiste à une sorte de retour au modèle représentation. Cependant, la simulation complexe est aujourd'hui une représentation en un sens nouveau car seul l'ordinateur en permet la manipulation. Cela pose le problème de la validation du modèle : comment valider un modèle qui, de par sa complexité, échappe à notre regard intuitif et à notre pensée linéaire ? Dans Amap, nous l'avons dit, la validation s'est faite pas à pas, type d'entité par type d'entité : le modèle de simulation intègre un savoir expert qui a été à chaque fois localement validé. Mais la validation globale de telles simulations peut difficilement se faire quantitativement : ainsi, aux yeux des réfractaires, elle demeure incertaine. Pour s'en convaincre, il n'est que de citer les

problèmes actuels, sans cesse croissants, de vérification, validation et certification des logiciels de simulation. Néanmoins, pour la modélisation des phénomènes de croissance spatialisés, le découpage et la modélisation de la réalité en entités génératrices spatio-temporellement « intuitives » (à échelle humaine) tend à accréditer une approche qui serait tout à la fois orientée objet et assise sur un espace virtuel représentatif.

Remerciements

Je tiens à remercier vivement G. Ramunni, P. Matarasso ainsi que tous les participants au séminaire Motive/Pevs du CNRS, pour les discussions stimulantes que nous avons eues. Un grand merci également à tous ceux avec lesquels j'ai pu m'entretenir : H. Bichat, A. Coleno, J. Françon, F. Houllier, J.-M. Legay, Ph. de Reffye et T. Sachs. Je remercie également les lecteurs de NSS qui m'ont aidé à améliorer ce texte.

Références

- Althusser, L., 1967. Philosophie et philosophie spontanée des savants. Maspero, Paris.
- Bachelard, G., 1951. L'activité rationaliste de la physique contemporaine. PUF, Paris.
- Badiou, A., 1969. Le concept de modèle. Maspero, Paris.
- Barberousse, A., Ludwig, P., 2000. Les modèles comme fictions. Philosophie 68, 16-43.
- Bouchon, J., 1995. Architecture des arbres fruitiers et forestiers. Actes du colloque des 23-25 novembre 1993 (Montpellier), 74. Inra-éditions, collection « Les colloques », Paris.
- Bouleau, N., 1999. Philosophies des mathématiques et de la modélisation. L'Harmattan, Paris.
- Bunge, M., 1968. Les concepts de modèle. L'âge de la Science, 3, juillet-septembre. pp. 165-180.
- Canguilhem, G., 1963. Modèles et analogies dans la découverte en biologie. Études d'histoire et de philosophie des sciences concernant les vivants et la vie. Vrin, Paris, pp. 305-318.
- Canguilhem, G., 1965. La connaissance de la vie. Vrin, Paris.
- Chazal, G., 1994. La simulation informatique comme mesure du possible. La mesure : instruments et philosophes. Champ-Vallon, Paris, pp. 147-155.
- Cheruy, A., Gautier, C., Pavé, A., 1980. Analyse de systèmes biologiques : certains aspects méthodologiques liés à la modélisation. In: Lesourne, J. (Ed.), La notion de système dans les sciences contemporaines, Tome I. Librairie de l'Université, Aix-en-Provence, pp. 73-152.
- Dagognet, F., 1973. Écriture et iconographie. Vrin, Paris.
- Engels, F., 1876. Dialectique de la nature. Traduction française : 1952. Éditions Sociales, Paris.
- Foucault, M., 1969. L'archéologie du savoir. NRF-Gallimard, Paris.
- Galison, P., 1997. Image and Logic. The University of Chicago Press, Chicago.
- Granger, G.G., 2000. Sciences et réalité. Odile Jacob, Paris.
- Haldane, J.B.S., 1946. La philosophie marxiste et les sciences. Éditions Sociales, Paris.
- Hallé, F., Oldeman, R.A.A., 1974. Essai sur l'architecture et la dynamique de croissance des arbres tropicaux. Masson, Paris.
- Hill, D.R.C., Coquillard, P., 1997. Modélisation et simulation d'écosystèmes. Masson, Paris.
- Jean, R.V., 1978. Phytomathématique. Les presses de l'Université du Québec, Québec.
- Kingsland, S.E., 1995. Modeling Nature, 2^e. The University of Chicago Press, Chicago.
- Legay, J.M., 1973. La méthode des modèles, état actuel de la méthode expérimentale. Informatique et Biosphère, 5-73.
- Legay, J.M., 1997. L'expérience et le modèle. Inra Éditions, Paris.
- Lénine, V.I., 1908. Matérialisme et empiriocriticisme. Éditions sociales, Paris (Traduction 1973).
- Lévêque, C., 2001. Écologie. De l'écosystème à la biosphère. Dunod, Paris.
- Lévy, P., 1987. La machine univers - Création, cognition et culture informatique. La Découverte, Paris.
- Lévy, P., 1990. Les technologies de l'intelligence - L'avenir de la pensée à l'ère informatique. La Découverte, Paris.
- Livet, P., 1991. Reproductions et simulations. Systèmes naturels - Systèmes artificiels, Champ-Vallon. pp. 140-147.
- Nouvel, P., 2002. Enquête sur le concept de modèle. PUF, Paris.
- Parrochia, D., 2000. L'expérience dans les sciences : modèles et simulation. Qu'est-ce que la vie ? Odile Jacob, Paris, pp. 193-203.
- Prenant, M., 1935. Biologie et marxisme. Éditions sociales internationales, Paris.
- Quéau, P., 1986. Éloge de la simulation. Champ-Vallon, Paris.
- Quéau, P., 1994. Le virtuel. Champ-Vallon, Paris.
- Rashevsky, N., 1948. Form of plants. Mathematical Biophysics, Chapter XLIX. University of Chicago Press, Chicago, pp. 575-579.
- Reffye (de), Ph, 1979. Modélisation de l'architecture des arbres par des processus stochastiques. Simulation spatiale des modèles tropicaux sous l'effet de la pesanteur. Application au *Coffea Robusta*. Th. Doct. État, Université Paris-Sud, Orsay.
- Rosnay (de), J., 1975. Le microscope. Seuil, Paris.
- Skellam, J.G., 1972. Some philosophical aspects of mathematical modeling in empirical science with special reference to ecology. Mathematical Models in Ecology, Proc. of the 12th Symposium of the Brit Ecol Soc. pp. 13-28.
- Stengers, I., 1997. Cosmopolitiques VI - La vie et l'artifice : visages de l'émergence. La Découverte, Paris.
- Teilhard de Chardin, P., 1955. Le phénomène humain. Seuil, Paris.

- Teissier, G., 1946. *Matérialisme dialectique et biologie*. Cours de philosophie fascicule V. Éditions sociales, Paris.
- Van Fraassen, B.C., 1994. *Lois et symétrie*. Vrin, Paris (Traduction).
- Varenne, F., 2001. What does a computer simulation prove? The case of plant modeling at Cirad. In: Giambiasi, N., Frydman, C. (Eds.), *Simulation in Industry*, Proc. of the 13th European Symposium on Simulation, ESS 2001, Marseille, October 18-20. SCS Europe Bvba, Ghent, pp. 549-554.
- Varenne, F., 2003. La simulation conçue comme expérience concrète. Actes du colloque de Rochebrune sur Le statut épistémologique de la simulation, organisé par le Cirad, l'Arco et l'Affia, janvier 2003, éditions ENST, Paris, pp. 299-313.
- Varenne, F., 2003b. Bachelard avec la simulation informatique : nous faut-il reconduire sa critique de l'intuition ? Actes du colloque. *Confiance raisonnée et défiance rationnelle, la surveillance intellectuelle de soi à partir de l'œuvre de Bachelard*, organisé à l'Université de Franche-Comté en décembre 2002, à paraître.

Available online at www.sciencedirect.com

