

LA NOTION DE MODELE DANS LES SCIENCES SOCIALES : ANCIENNES ET NOUVELLES SIGNIFICATIONS

Michel ARMATTE¹

RÉSUMÉ – *La notion de modèle joue un rôle fondamental aussi bien dans les sciences physiques que dans les sciences sociales. En s'appuyant sur les travaux de différents colloques et de travaux plus récents du centre Koyré, l'auteur dresse une fresque des différentes acceptions de la notion de modèle qui passe par la physique de Maxwell et Boltzmann à la fin du XIX^e siècle, par les débats du Cercle de Vienne et la théorie des modèles en logique mathématique dans les années 1930-1950, puis par l'explosion de la notion plus empirique de modèle dans les sciences sociales aux deux moments clés des années trente et de l'immédiat après guerre avec le développement des mathématiques appliquées, de l'informatique, de la recherche opérationnelle, et de la modélisation structurelle. Une rupture importante apparaît dans les années 1970 qui invite à considérer que la modélisation des systèmes complexes ne trouve plus appui sur une théorie scientifique mais sur une multitude de savoirs que le modèle et plus encore le logiciel sont à même d'intégrer, en fonction d'objectifs de connaissance et d'intervention. Dès lors c'est davantage la modélisation comme activité sociale et politique, inscrite dans des logiques d'acteurs et de décision collective, qui doit être considérée plutôt que le modèle comme objet médiateur purement cognitif entre théorie et observation.*

MOTS-CLÉS – Économétrie, Épistémologie, Histoire des sciences, Modèle, Sciences sociales

SUMMARY – Models in Social Sciences: Old and New Mining

The model is today a crucial notion in the social and physical sciences. Revisiting several philosophical or historical works on models, the author gives elements for a genealogy of this category, ranging from its use by Maxwell and Boltzmann in physics to the debates of the Vienna circle on model theory in mathematical logic, and later, the irruption of the notion in the field of social sciences around World War 2, due to the progress made in applied mathematics, computer science and simulations as well as in structural modelling and operational research. The study of complex objects such as ecosystems, the climate or the world economy, which can not be represented within the framework of a single theory, have necessitated a plurality of approaches to knowledge, some of which are theoretical, others empirical. The model, and the software that is used must seek to integrate these various elements of knowledge, while taking into account the aims of the modelling activity; arbitrages, decisions about actions and the management of systems. Rather than a cognitive mediator between theory and observation, modelling has come to be a social and political activity, intrinsically linked to the motivations of the participating actors and to collective decisions.

KEYWORDS – Econometrics, Epistemology, History of sciences Model, Sciences studies, Social sciences

L'objectif de ce texte qui se veut synthétique est de tracer un tableau historique des formes qu'a pu prendre au cours du XX^e siècle la modélisation mathématique en sciences sociales, et plus particulièrement en économétrie, puis de résumer en quelques

¹ Université Paris-Dauphine (Place de Lattre de Tassigny, 75775 PARIS cedex 16) et Centre Alexandre Koyré, michel.armatte@dauphine.fr

propositions simples les résultats de travaux qui ont été menés sur ce sujet dans les dernières décennies². Quitte à prendre parfois une position plus personnelle fondée sur des recherches menées depuis une dizaine d'années sur le champ plus spécifique de l'économétrie, de la recherche opérationnelle, et de la modélisation globale du changement climatique³. La modélisation mathématique est une pratique scientifique très répandue, que l'on a le plus souvent analysée du seul point de vue cognitif avant d'en repérer toutes les dimensions sociales. De ce point de vue, méthodologues et épistémologues se sont focalisés sur la notion de modèle elle-même.

Le terme de modèle a pu être utilisé de façon très ancienne par les artisans modelers, les tailleurs de pierre, les architectes comme en témoigne l'étymologie du mot le latin *modulus* désignait à l'origine « la mesure arbitraire servant à établir les rapports de proportion entre les parties d'un ouvrage d'architecture ». Au Moyen-âge ce *modulus* devient *moule* en français, *mould* en anglais et *model* en allemand, et à la Renaissance l'italien *modello* donne le français *modèle*, l'anglais *model* et l'allemand *modell*. On retrouve dans les définitions des dictionnaires contemporains, 5 classes de signification et d'usage le modèle comme *réfèrent* ou prototype à reproduire (le modèle du peintre), le modèle comme *maquette* d'un dispositif réel (chez le fondeur, l'architecte), le modèle comme *type idéal* dégagé d'une population homogène (un modèle de sainteté, de candeur, de beauté...), le modèle comme *icône* ou *dispositif mécanique* représentant une idée abstraite (le modèle hydraulique de la circulation monétaire chez Irving Fisher par exemple), le *formalisme* logico-mathématique qui représente un système, cas auquel nous nous intéresserons principalement⁴. Même si

² Ces travaux sur les modèles ont d'abord été le propre des épistémologues et des logiciens : on peut s'en faire une bonne idée en reprenant les textes des encyclopédies (Andler, Mouloud...) ou bien encore les principaux colloques consacrés en France à la notion de modèle depuis les années 1960 (cf. [Freudenthal, 1961] ; [Delattre et Tellier, 1979] ; [Brissaud, Foré et Zighed, 1990]). L'irruption du structuralisme dans les années 1960 a fourni le cadre d'un débat entre mathématiciens et linguistes ou anthropologues sur la question des modèles (Levi-Strauss, Thom). Des historiens des sciences ont offert une vision renouvelée de la notion de modèle en l'inscrivant dans un mouvement plus large de mathématisation, et permis d'en préciser la spécificité et l'irruption simultanée dans les années 1920 [Israël, 1996]. Les disciplines ont elles-mêmes produit une historiographie de leurs formes de modèles, comme l'économie mathématique et l'économétrie (Tinbergen, Haavelmo, Simon, Von Neumann, Forrester, et plus récemment Bodkin [1995], Walliser [1994], Morgan [1990], Armatte [1995], Morgan et Morrison [1999]). Différentes écoles de sociologie des sciences, pour beaucoup inspirées des *Sciences studies*, ont préféré substituer à la catégorie « modèle » trop marquée par une problématique de cognition, une catégorie « modélisation » qui permet de la rattacher à une pratique sociale dans un champ scientifique (Bourdieu), à l'anthropologie de laboratoire (Latour), à des « investissements de forme » (Thévenot), ou à des constructions de conventions, et ils ont enrichi cette historiographie des modèles de nombreuses études de cas. M. Armatte et A. Dahan ont récemment publié (2004) un long article et un dossier dans la revue d'histoire des sciences, à la suite d'un séminaire de plusieurs années sur la question de la modélisation dans les sciences physiques et les sciences sociales. Voir aussi les ouvrages récents de [Dupuy, 1992, 1994] ; [Nouvel, 2002] ; [Bouleau, 1999].

³ Pour l'économétrie et la RO, cf. [Armatte, 1995, 1996, 1998, 2003] [Armatte et Desrosières, 2000]. Sur la question des modèles, voir d'une part les chapitres 2 et 3 de notre thèse de 1995, d'autre part [Armatte, 2000 et 2003], et surtout le dossier complet sur la modélisation publié par [Armatte et Dahan dans la *Revue d'histoire des Sciences*, 2005]. L'article présent est davantage une synthèse de ces travaux qu'un prolongement.

⁴ Ce panorama des significations du terme « modèle » est issu des travaux des différents colloques de l'après-guerre sur cette notion [Freudenthal, 1961] [Delattre et Tellier, 1979] et [Brissaud *et al.*, 1990]. Il est devenu classique à la suite des textes de Suzanne Bachelard [1979] et de Hourya Sinaceur [1991, 1999].

d'imperceptibles glissements permettent de passer de l'une à l'autre de ces significations, notons que les deux premières voient, comme dans l'étymologie latine, le modèle comme prototype alors que dans les trois dernières le modèle devient un type, une abstraction extraite d'une réalité. Mais cette réversibilité est bien repérée par plusieurs auteurs : « Le modèle peut être compris comme original et comme copie, comme archétype ou comme simple réalisation [...] et pour chaque type de signification, cette équivoque demeure plus ou moins obscurément nous dit Suzanne Bachelard. Illustrons cela par la célèbre figure de l'homme moyen que Quetelet, au milieu du XIX^e siècle, conçoit à la fois comme le modèle-moule sur lequel les hommes ont été a priori conçus et comme le résultat d'une opération d'abstraction faite *a posteriori* sur une population pour faire émerger un type par le calcul de moyennes.

Nous centrant principalement sur l'usage scientifique de la notion de modèle, et plus précisément sur sa forme mathématique, nous nous en tenons à la dernière de ces acceptions, et nous posons tout de suite la question essentielle : La notion de modèle doit-elle être distinguée de toutes les formes anciennes de « mathématisation du réel » — Pour reprendre une formulation de Giorgio Israël — qui ont accompagné le développement des sciences physiques aussi bien que des sciences « morales » dès le XVII^e siècle ? Et si oui quels seraient les critères qui permettraient de caractériser cette catégorie de modèle comme nouvelle et spécifique ? La « géométrie du hasard » de Pascal, la géométrie algébrique de Descartes, la mathématisation galiléenne de la chute des corps, la théorie newtonienne de l'attraction universelle, la « mathématique sociale » de Condorcet, l'application laplacienne de la théorie analytique des probabilités à la mécanique céleste et aux questions de population, le traitement mathématique de l'équilibre économique par Cournot puis Walras, ont pu apparaître *a posteriori* comme des formes de modélisation, au sens où, malgré leur diversité épistémologique, on pouvait leur appliquer une définition assez standard de la notion de modèle : une *représentation* d'un dispositif réel par un système formel — par exemple un système d'équations — qui permette à la fois de penser ce dispositif, d'étudier son fonctionnement, et d'agir sur lui pour le contrôler ou le faire évoluer.

Il existe cependant de sérieuses raisons de s'abstenir d'une telle rétro-projection de la notion de modèle sur toutes ces formes historiques de mathématisation. La première raison est de type nominaliste : parler de modèle dans les sciences physiques avant 1860, dans les mathématiques avant 1900, et pour les sciences sociales avant 1920, constituerait un anachronisme dans le vocabulaire mobilisé par les acteurs eux-mêmes. Ni Pascal, ni Descartes, ni Newton, ni Laplace ne parlent de modélisation pour décrire ce qu'ils font. La seconde raison de cette réticence, que nous partageons avec les historiens des sciences, est que la notion de modèle mise en avant aussi bien en physique qu'en logique mathématique repose fortement sur des notions d'analogie structurelle et d'isomorphisme qui prennent tout leur sens dans le cadre d'un positivisme caractéristique de la seconde moitié du XIX^e siècle, dans lequel la spécificité intrinsèque des différents objets de science perd du terrain au profit des homologies de forme et de relations. Un troisième ingrédient qui caractérise plus particulièrement la notion de modèle dans les sciences sociales au XX^e siècle est la possibilité de quantification des phénomènes sociaux soit dans des dispositifs d'observation à large échelle qui impliquent des systèmes d'information statistique, soit dans des dispositifs expérimentaux dont l'invention peut certes être rapportée à l'époque de Boyle mais qui, pour les sciences sociales, ne prennent une certaine ampleur qu'après 1945. Le quatrième ingrédient constitutif de la notion de modèle est certainement celui de simulation et manipulation qui prend une importance capitale au XX^e siècle, dès lors

que la syntaxe et la sémantique des modèles s'accompagne d'une pragmatique, faisant de ces outils cognitifs des outils sociaux de gestion et de gouvernement des hommes en société. Reprenons ces différents points. Le seul premier critère, celui de la terminologie, suffirait à justifier que notre enquête ne commence qu'à la fin du XIX^e siècle, et dans le domaine très spécifique à la physique.

LA NOTION DE MODÈLE EN PHYSIQUE

Le rédacteur de l'article «*Model*» de la dixième édition de *l'Encyclopedia Britannica*, qui n'est autre que Ludwig Boltzmann, définit le modèle comme une *représentation tangible... d'un objet qui a une existence réelle ou qui est une construction factuelle ou mentale*, et il étend le sens de cette notion des usages techniques et artistiques – le modèle du fondeur ou du sculpteur – aux usages scientifiques, affirmant que *les modèles dans les sciences mathématiques, physiques et mécaniques sont de la plus grande importance*□

Il y a longtemps que les philosophes ont perçu l'essence de notre processus de pensée dans le fait que nous attachons aux objets réels qui nous entourent des attributs physiques particuliers - nos concepts - et que grâce à eux nous essayons de signaler ces objets à notre esprit. De telles vues n'étaient auparavant considérées par mathématiciens et physiciens comme rien de plus que stériles spéculations, mais elles ont été récemment intimement associées par Maxwell, Helmholtz, Mach, Hertz, et beaucoup d'autres au corps entier de la théorie mathématique et physique. Selon ces vues, nos pensées sont aux choses dans le même rapport que les modèles sont aux objets qu'ils représentent. L'essence du processus est l'attachement d'un concept ayant un contenu défini à chaque chose, mais sans impliquer une complète similarité entre chose et pensée ; car naturellement nous ne savons presque rien de la ressemblance entre nos idées et les choses auxquelles nous les rattachons. Ce qu'est cette ressemblance repose principalement sur la nature de la connexion, la corrélation étant analogue à celle que nous obtenons entre pensée et langage, entre langage et écriture, entre sons musicaux et notes sur la portée, etc...

Boltzmann associe ce rôle nouveau des modèles dans les sciences «*avec les changements qui ont pris place dans nos conceptions de la nature*□, c'est-à-dire l'abandon de la tradition newtonienne, du mécanisme, et du réalisme. Et il attribue à Clark Maxwell un rôle déterminant dans la remise en cause du mécanisme dominant et l'exploitation systématique des analogies physiques. Lamé avait déjà souligné en 1859 *la coïncidence remarquable qui rapproche les deux théories [du magnétisme et de la chaleur] à tel point qu'en résolvant analytiquement certaine question particulière chez l'une, on a immédiatement la solution d'une question correspondante chez l'autre*⁵. Maxwell explicite cette correspondance et lui donne un rôle fondamental dans la physique□

Par analogie physique, j'entends cette ressemblance partielle entre les lois d'une science et les lois d'une autre science qui fait que l'une des deux sciences peut servir à illustrer l'autre.

⁵ G. Lamé, «*Leçons sur les coordonnées curvilignes et leurs diverses applications*□, Paris, Mallet-Bachelier, 1859, p. IX, cité par S. BACHELARD [1979].

La justesse d'une illustration scientifique vient de ce que les deux systèmes d'idées qui sont comparés l'un avec l'autre sont réellement analogues dans la forme ; ou qu'en d'autres termes, vient de ce que les quantités physiques correspondantes appartiennent véritablement à la même classe mathématique. Quand cette condition est remplie, l'illustration n'est pas simplement commode pour enseigner la science d'une manière agréable et facile, mais la reconnaissance de l'analogie formelle entre les deux systèmes d'idées conduit à une connaissance des deux, plus profonde que celle qui pourrait être obtenue quand on les étudie chacun séparément⁶.

On voit bien ici que le fondement proposé à la notion de modèle est à la fois le transport analogique, et le support mathématique qui permet d'identifier l'analogie structurelle et d'automatiser ce transport. On a là une condition forte de la notion de modèle qui la distingue d'une simple mathématisation. Et c'est d'ailleurs ce principe que choisit Giorgio Israël pour identifier dans les travaux de Van der Pol des années 1920 les premiers modèles – en l'occurrence un modèle de battements du cœur – au sens moderne d'une forme mathématique qui circule entre de nombreux domaines scientifiques.

Les «*analogies mécaniques*» dont parle Boltzmann sont d'abord celles de maquettes de bois, métal ou carton, puis celles des systèmes d'équations, que Pierre Duhem, dans sa *Physique* de 1906, attribue à W Thomson (1884) et plus particulièrement

au génie anglais dont le pouvoir imaginaire peut s'exercer sur une multitude de faits concrets, mais ne peut saisir la théorie qu'à travers un modèle [...] dont l'esprit ample et faible leur donne une extrême faculté à imaginer des ensembles très compliqués de faits concrets et une extrême difficulté à concevoir des notions abstraites et à formuler des principes généraux (...) et pour lesquels comprendre un phénomène c'est composer un modèle qui imite ce phénomène.

Duhem reconnaît cependant que

L'abandon du souci logique qui pesait sur les anciennes théories, la substitution de modèles indépendants les uns des autres aux déductions rigoureusement enchaînées assure aux recherches du physicien une souplesse et une liberté qui sont éminemment fécondes en découvertes⁷.

Mais en sous-entendant ainsi qu'il vaudrait mieux saisir directement la théorie dans son abstraction comme le génie français, il témoigne à la fois de l'usage consacré du terme de modèle mais aussi d'un certain retard de son épistémologie sur la pratique et la théorisation des physiciens de son temps. Boltzmann voit au contraire une continuité entre les modèles matériels et les modèles mathématiques

une continuation et une intégration de notre processus de pensée, puisque selon ces conceptions, la théorie physique est essentiellement une construction mentale de modèles mécaniques.

⁶ J.C. Maxwell, "Scientific papers", Cambridge University Press, 1890, t.I, p.156 ; t.II, p.219.

⁷ Pierre Duhem, *La théorie de la Physique*, 1^e édition 1906 ; Chap IV.

Il se réfère ici explicitement à une phrase choc de Heinrich Hertz : *nos pensées sont aux choses dans le même rapport que les modèles sont aux objets qu'ils représentent*, et l'on peut noter avec Marcel Boumans, que ces représentations, dénotées par *Darstellung* au lieu de *Vorstellung*, se réfèrent à des « schèmes consciemment construits » plutôt qu'à des images des sens. L'usage des modèles mathématiques, mieux adapté à la description de relations entre quantités, et conforme à un phénoménalisme qui privilégie la description aux dépens de l'explication, a été systématisé par Kirshhoff, Hertz, et enfin Mach. *La Mécanique* de Mach s'inscrit pleinement dans cette optique de la description mais elle met en avant le mouvement comme notion fondamentale, tandis que l'école énergétique, abandonne aussi la notion de matière pour celle d'énergie comme fondement de sa physique. Boltzmann, qui sut se tenir à mi-chemin entre le dogme de la phénoménologie et les nombreuses abstractions véhiculées par le mécanisme, se déclarait incapable de séparer les faits de leurs représentations et considérait par conséquent les modèles comme « tangibles représentations » ... « de la plus haute importance dans les sciences mathématiques, physiques et mécaniques ».

Paul Ehrenfest, élève de Boltzmann est co-auteur avec Tatyana Ehrenfest d'un long article sur la Mécanique statistique dans l'Encyclopédie des Sciences mathématiques (1912)⁸ qui témoigne d'un usage récurrent et important de la notion de modèle⁹ quelquefois assimilée à « un schème conceptuel ».

l'interprétation cinétique d'un processus aérodynamique, comme n'importe quelle autre explication d'un phénomène physique, consiste en la représentation d'une séquence observée des états par un schème purement conceptuel.

La traduction pour l'Encyclopédie française dirigée par J. Molk prend la forme d'un supplément dû à Borel [1915] qui actualise cet article et témoigne du même usage :

L'évolution vers les états les plus probables apparaît en effet alors, non comme une propriété d'un modèle particulier, mais telle qu'elle est réellement, comme une propriété statistique de l'infinité de modèles qui correspondent au bout d'une fraction de seconde à un gaz réel.

La notion de modèle a donc acquis une position centrale et irréversible dans la physique du début du siècle.

LA NOTION DE MODÈLE EN LOGIQUE MATHÉMATIQUE

Peu après 1920, cette notion de modèle va dominer la logique mathématique, et la transition depuis la physique n'est pas de pure forme. Il y a bien des circonstances historiques, qui vont faciliter ce passage. En premier lieu la crise des fondements des mathématiques.

⁸ Ehrenfest P. and Ehrenfest-Afanassjewa T., 1912, *Encyklopädie der mathematischen Wissenschaften*, B.G. Teubner (ed), IV:2:II, n° 6, Leipzig, trad. Borel, *Encyclopédie des sciences mathématiques pures et appliquées*, J. Molk (ed.), 1915.

⁹ « Le modèle d'un gaz consiste en n molécules polyatomiques égales entre elles, ayant chacune r degrés de liberté. Une phase (cinétique) du modèle à l'époque t est l'ensemble des $2rn$ nombres par lesquels la configuration et le mouvement des n molécules sont exactement connus (...) Les changements de phase du modèle sont définies par les équations canoniques d'Hamilton... » (p. 204).

Les premières axiomatiques de Pasch (1882) en géométrie, de Peano (1889) en arithmétique, et de Hilbert (1899) en géométrie ont révélé des problèmes d'inconsistance et des interrogations sur l'existence simultanée de plusieurs géométries, l'apparition d'objets «monstrueux» comme les courbes discontinues dérivables partout, et les antinomies de la théorie des ensembles de Cantor. Russell et Whitehead, pensent fournir dans leurs *Principia* (1910-1913) une première réponse à cette crise des fondements mathématiques par la seule logique : les 5 axiomes de Peano par exemple sont remplacés chez Russell par une vingtaine de «propositions premières» entièrement logiques et de pure forme. La notion logique de «type» qui interdit la définition circulaire d'un objet par une classe d'objets qui comprend le dit objet joue par exemple ce rôle. De cette façon, les mathématiques n'avaient plus besoin d'avoir des axiomes propres, portant sur les objets mathématiques, et se voyaient réduites à une extension naturelle des lois et du domaine de la logique. Un second projet pour sortir de cette querelle des fondements est celui du formalisme de Hilbert dans les années 1920, qui propose de traiter de la question de la consistance d'une théorie mathématique à l'intérieur d'une nouvelle discipline, la métamathématique, qui établira des règles de construction et de dérivation de formules indépendantes de leur contenu ou signification mathématique. La notion principale de cette métamathématique est celle de *système formel*. Un tel système repose :

1. sur un alphabet de symboles
2. une liste de règles morphologiques et syntaxiques de formation de formules admissibles
3. un ensemble d'axiomes admis sans démonstration
4. un ensemble de règles d'inférence et de déduction.

La théorie (formalisée) est la suite des formules qui résultent des axiomes et des démonstrations (théorèmes). Le système formel permet de décrire complètement un *calcul* comme celui des propositions ou des prédicats en logique, mais peut également rendre compte de l'arithmétique, de la géométrie, ou du jeu d'échec, voire de n'importe quel jeu de signes. Hilbert croit qu'un tel système formel peut fournir des preuves de la consistance (non-contradiction), et de l'indépendance d'une théorie axiomatique. Dès lors, le formalisme prolonge l'axiomatique «En faisant maintenant pour les règles de logique *selon lesquelles* on raisonne ce que l'on avait fait précédemment pour les postulats *sur lesquels* on raisonne» les énoncer expressément et en totalité¹⁰.

Sous la pression de nombreuses critiques, en particulier des réalistes attachés aux significations des objets formels, mais aussi des intuitionnistes, l'approche formaliste a dû renforcer son programme en le limitant à un fondement «finitiste» des mathématiques, dont le noyau dur était l'arithmétique. Le programme formaliste a donc cherché à intégrer la démonstration métamathématique de la consistance d'une théorie dans la théorie elle-même. Malheureusement le procédé inventé par Gödel d'arithmétisation de la syntaxe par projection – consistant à représenter des assertions métamathématiques portant sur un calcul arithmétique par des formules arithmétiques de ce calcul – aboutit à ses deux fameux théorèmes d'incomplétude de 1931 :

- a) une théorie arithmétique formellement construite comme celle des *Principia* comporte nécessairement des énoncés indécidables
- b) la cohérence de cette théorie ne peut être démontrée dans le cadre de cette théorie.

¹⁰ Maurice Blanché, [1955], p. 59.

Le programme de Hilbert se heurte donc à l'impossibilité d'une formalisation complète des diverses branches des mathématiques, et, comme le dit Blanché (p. 69), « \square faut bien conclure qu'il y a à l'intérieur d'une mathématique axiomatisée du vrai non prouvable».

C'est dans ce contexte qu'interviennent les logiciens du Cercle de Vienne après 1935. Leur programme d'unification de la science sur une base anti-métaphysique est un prolongement logique du positivisme empiriste d'Ernst Mach, dont la chaire de philosophie des sciences inductives, fondée à Vienne en 1895, et occupée par Ludwig Boltzmann (1902-1906), Adolf Stöhr (1906-1922), et Moritz Schlick (1922-1936) a constitué le pivot institutionnel, relayé parfois par l'Association E. Mach. Le programme initial du Cercle, dont on trouve un manifeste dans le « \square ahier jaune \square publié par Hahn, Neurath et Carnap en 1929¹¹ affirme \square

Nous avons caractérisé la conception scientifique du monde par deux déterminations. Premièrement elle est empiriste et positive. Seule existe la connaissance venue de l'expérience, qui repose sur ce qui est immédiatement donné. De cette façon, se trouve tracée la frontière qui délimite le contenu de toute science légitime. Deuxièmement, la conception scientifique du monde se caractérise par l'application d'une certaine méthode, à savoir celle de l'analyse logique. Le but de l'effort scientifique, la science unitaire, doit être atteint par l'application de cette analyse logique aux matériaux empiriques. [Manifeste, p. 118].

Ce programme est d'abord un travail d'épuration de la science de ses « \square malgemes métaphysiques \square . Il faut « \square purifier les concepts \square comme espace, temps, substance, causalité, probabilité en physique, pour ne point parler des entéléchies biologiques, et d'autres faux concepts des sciences sociales. La méthode logique assimile l'édifice scientifique à une construction linguistique, dont la base est faite « \square énoncés protocolaires \square en « \square correspondance \square avec les faits enregistrés, base sur laquelle sont construits par des règles syntaxiques cohérentes, des énoncés non protocolaires. Dès 1930, Carnap construit une théorie syntaxique du langage de la science [Carnap, 1934], indépendante de toute signification, qui prolonge la grammaire logique du *Tractatus* de Wittgenstein et la métamathématique de Hilbert. Mais en 1935, sous l'effet des découvertes de Gödel, et des premiers travaux de Tarski¹², Carnap reconnaît l'impasse de cette première approche \square

*Toutes les mathématiques peuvent être formalisées mais les mathématiques ne peuvent pas être épuisées par un système ; elles requièrent une série infinie de langages toujours plus riches.*¹³

Il se convertit à une théorie logique nouvelle dans laquelle la sémantique formelle va relayer la preuve syntaxique défailante, et la notion formalisée, logicisée, de modèle devient un concept clé de la logique mathématique. L'idée consiste à revenir à la preuve extérieure de consistance des géométries non euclidiennes déjà esquissée par Beltrami \square Une autre géométrie comme celle de Riemann peut se construire par homomorphisme entre l'ensemble de ses axiomes et celui de la géométrie euclidienne, ces représentations

¹¹ Cf. Neurath, [1929].

¹² Tarski, [1935].

¹³ Carnap, *The logical syntax of language*, 1964, p. 222, cité par Michel Combès, *Fondement des mathématiques*, PUF, 1971.

constituant un modèle euclidien de la géométrie Riemanienne. La confiance placée dans la géométrie euclidienne offre alors une sorte de preuve relative de la consistance d'une autre géométrie. Cette idée, articulée avec la logique des systèmes formels, conduit à ce qui deviendra dans les années cinquante, principalement au travers des travaux de Tarski, la *théorie des modèles*. Dans cette théorie, un langage L (ou système formel, constitué d'un alphabet A de symboles et de formules admissibles F) décrit une collection de structures mathématiques S grâce à une correspondance terme à terme entre symboles et formules de L d'une part et éléments et relations de S d'autre part, dite interprétation de L dans S . S est dite modèle d'un formalisme ou sous-ensemble de formules $F' \subseteq L$ si toute formule de F' est satisfaite dans S . Si F' contient toutes ses conséquences, on dit qu'il est consistant, et s'il admet un modèle S , on dit que c'est une théorie. Une théorie est donc un sous-ensemble consistant de formules F' de L partiellement ou totalement interprété par un modèle S .

Cette approche sémantique n'a pas seulement joué un rôle de refondation de la logique. Elle a permis des percées importantes dans les mathématiques elles-mêmes, en fonctionnant comme une heuristique \square partant d'un premier modèle dit standard (pour lequel l'induction jouera un rôle important) on peut en induire une théorie formelle dont il n'est plus que l'un des représentants, et chercher les autres modèles non-standards possibles soit pour le même jeu d'axiomes, soit par une modification d'un des axiomes. C'est bien ainsi, ou presque ainsi, que l'école de Bourbaki a fonctionné comme on peut le montrer avec l'exemple de la théorie algébrique des groupes décrit dans *L'architecture des mathématiques* \square l'addition des nombres réels, la multiplication des entiers modulo p , et la composition des déplacements dans l'espace ordinaire ont constitué 3 modèles d'une théorie plus générale que l'on obtient en remplaçant ces opérations et leurs objets par une formule générale (xTy) à laquelle on n'attribue ni signification ni propriétés autres que les 3 axiomes indépendants d'associativité, d'existence d'un élément neutre, et d'un inverse pour tout élément. Ce qui permet à Bourbaki d'affirmer dans le même texte que l'axiomatique associée au formalisme logique constitue « \square le système Taylor des mathématiques \square ».

IRRUPTION DE LA NOTION DE MODÈLE EN SCIENCES SOCIALES DANS LES ANNÉES 1930.

Le krach financier de 1929 puis la crise économique qui suivit dans la première moitié des années 1930, ont eu des conséquences d'une ampleur considérable sur l'économie réelle (chômage, lock-out, inflation) qui sont bien connus, et par ricochet sur les politiques d'inspiration keynésiennes qui ont alors tenté de répondre à cette crise aussi bien aux États-Unis (New Deal) qu'en Europe. Mais elles ont eu également des conséquences sur la méthodologie même de l'économie politique, pas encore transformée en science économique. Des lieux nouveaux de débats scientifiques apparaissent comme l'*International Econometric Society* et son avant-garde la *Cowles Commission*, qui vont se lancer dans un programme de réduction du dualisme entre, d'une part, les approches mathématiques hypothético déductives bien incarnées par la révolution marginaliste et la théorie de l'équilibre général de Walras, et, d'autre part l'approche inductive de la statistique économique dont la forme avancée dans les années 1920 fut la description et la prévision des cycles économiques à l'aide des baromètres économiques. Ce décrochage des analyses empiriques par rapport à la théorie formalisée ayant conduit à une impasse, dont l'impossible prévision et gestion de la grande Crise en était une preuve évidente, les nouveaux économètres travaillent à l'intégration de ces deux approches. Or l'outil par excellence de cette intégration est le modèle.

Un des premiers à le démontrer est le Hollandais Tinbergen, élève d'Ehrenfest ayant produit sous sa direction une thèse dont l'objectif est d'appliquer à l'économie la méthode des modèles mathématiques qui a si bien réussi en physique statistique. Comme le montre Boumans [1992], ce transfert de la physique se fait à l'aide des équations de Lagrange ou de Hamilton, c'est-à-dire sur la base de variables fonctionnelles que l'on détermine par un principe de minima (conservation de la quantité d'action) dont l'équivalent économique doit être trouvé pour chaque problème, et le procédé ressemble comme deux gouttes d'eau à la construction d'un modèle non standard. Dans une seconde approche Tinbergen construit ce qu'il appelle des «schèmes», inspirés à la fois des schèmes conceptuels de la mécanique statistique d'Ehrenfest, des modèles d'oscillateurs des ingénieurs, et du principe impulsion-propagation de Ragner Frisch illustré par son «modèle» de cheval à bascule. Ce n'est que dans un troisième temps que Tinbergen produit des modèles macroéconométriques des économies nationales des Pays-Bas puis des Etats-Unis qui le rendront célèbre. Constitués d'une vingtaine d'équations comptables et de comportement, dont la dynamique est donnée par la présence de variables retardées, le modèle se construit équation par équation avec une vague base théorique, et surtout une démarche statistique d'ajustement par des régressions multiples et des corrélations partielles. Il se résout en une équation finale aux différences dont les solutions sous certaines conditions numériques, sont cycliques. Tinbergen utilise alors le mot «modèle» pour la première fois et en dégage aussitôt un nouvel usage : la simulation de chocs et de politiques économiques, qui intéressent les différents acteurs (syndicats, partis, agences gouvernementales) de la régulation économique. Avec cette histoire¹⁴ nous avons un continuum qui va de la physique à l'économétrie et dans lequel la notion de modèle se transforme et se précise pour adopter la forme qui va s'imposer en science économique. On s'éloigne encore un peu de la notion formelle et logique de modèle pour rejoindre une idée plus empirique d'objet de simulation dont on peut étudier le comportement.

Même si son audace fut parfois jugée suspecte, Tinbergen avait montré le chemin à d'autres économistes. Pour n'évoquer que la situation française, on notera que Tinbergen y vint plusieurs fois faire des conférences, en particulier dans le cadre du Centre polytechnicien d'études économiques¹⁵, organe du mouvement X-Crise qui débattait ardemment des questions de réforme et de méthodologie économique dans les années 1930¹⁶. Divisia, chef de file des ingénieurs économistes, et cofondateur de *l'Econometric Society*, le cite dans sa conférence de 1933. Huber se réfère longuement à ses travaux en 1935¹⁷, Gibrat l'évoque dans sa chronique régulière sur l'économétrie, et il publie l'étude sur le modèle hollandais de 1937 dans sa collection «Impasses économiques». Les frères Guillaume utilisent une technologie des modèles qu'on pourrait croire empruntée à Tinbergen si elle ne lui était antérieure : Dès leur premier ouvrage *Sur les fondements de l'Economie rationnelle* (1932), et dans le n° 1 du Bulletin (1932-1933), cette approche est mise en avant, et la première partie de *L'Economie rationnelle* publiée en 1937 chez Hermann expose longuement les avantages d'une investigation des propriétés du système économique à l'aide de «petits modèles» qui s'inspirent explicitement de Volterra (1931), de Bohr, de l'hydraulique et

¹⁴ Cf. Morgan [1990], Boumans [1992], Armatte [1995] pour un récit plus détaillé.

¹⁵ Conférence du 9 juin 1938 sur «La méthode de la corrélation multiple» appliquée aux cours des actions. Il ne parle pas encore de «modèle», mais d'un «système de relations qui donne une image assez grossière de l'économie américaine».

¹⁶ Cf. Armatte [1998].

¹⁷ Compte rendu de la séance du 13 décembre 1935, *Bulletin du CPEE*.

de la cartographie, de Jean Rostand, et de Bridgman, inventeur de l'opérationnalisme. L'avantage est dans la simplification des mécanismes mais surtout dans la définition précise et opérationnelle des concepts de base, un souci que partage François Divisia¹⁸. Cependant les paramètres de ces modèles réduits restent inconnus ou connus par leur seul ordre de grandeur, et les modèles des frères Guillaume n'ont pas été testés empiriquement. Le «Principe de conservation de la valeur», qu'ils placent à la base de la notion d'équilibre et qu'ils exploitent mathématiquement, est l'analogue du principe de conservation de l'énergie en physique. Et leur démarche, comme celle de Jean Ullmo dans ses *Recherches sur l'équilibre économique*¹⁹, s'est inspirée d'abord de la physique mathématique avant de se tourner vers une «Modélisation» plus empirique selon une évolution semblable à celle de Tinbergen, que la citation suivante résume assez bien

L'économie classique a admis très tôt parmi les hypothèses plausibles, la suivante, laquelle, à première vue, semble s'imposer, à savoir la maximation (sic) de certaines grandeurs économiques : le profit pour l'entrepreneur, le salaire pour le salarié, etc. Dès lors le problème de l'équilibre deviendrait un problème de maxima simultanés, c'est-à-dire de maxima liés. C'est à la Mécanique également que nous devons les méthodes qui résolvent ces problèmes, où l'on a été conduit pour ce faire à maximiser certaines fonctions remarquables : les potentiels et les fonctions de forces. Transplantant ces modes de penser à la théorie des échanges, les économistes cherchent tout naturellement à former une fonction analogue, et ils construisirent celles que l'on nomme ophélimité. Ici, M. Ullmo remarque pertinemment que ces fonctions concernent essentiellement l'individu et que les économistes n'ont pas su construire une fonction analogue à l'énergie potentielle mutuelle d'un système de particules, c'est-à-dire d'un ensemble d'individus. [...] La confrontation avec l'expérience ne donnant que des résultats décevants, cette théorie mathématique est devenue le point de départ de la doctrine du libéralisme économique : de phénoménologique, la théorie est devenue normative. M. Ullmo estime que l'économie politique a parfaitement le droit d'être normative, mais elle doit l'être sans ambiguïté. Elle ne saurait par contre déterminer elle-même l'état souhaitable en partant d'hypothèses invérifiables. [...] Ainsi l'auteur ne tente pas de construire une fonction - une action suivant le langage des mécaniciens - dont les extréma fourniraient les équations de l'équilibre économique, comme l'action hamiltonienne fournit les équations de la Mécanique. Suivant la méthode des modèles que nous avons proposée, il bâtira des mondes économiques d'abord très simples, puis de plus en plus compliqués pour tendre vers la réalité, et cherchera s'il n'existe pas dans ces modèles une grandeur qui devrait être maximisée pour réaliser un certain état que l'on s'accordera à trouver souhaitable.²⁰

On ne peut trouver une meilleure expression de cet engouement pour les modèles utilisés comme une alternative à la faillite de la transposition de la mécanique

¹⁸ Divisia qui disait «Comprendre un phénomène a dit Sir W. Thomson, c'est pouvoir établir son modèle mécanique. Et cette formule très générale paraît pouvoir s'appliquer aussi aux problèmes économiques si l'on veut bien donner à l'expression de mécanisme un sens tout à fait général (REP, 1932).

¹⁹ Ullmo J. [1938].

²⁰ E & G. Guillaume, note bibliographique sur les *Recherches sur l'équilibre économique*, de Jean Ullmo, Bulletin CPEE, n° 45, p. 31-33.

rationnelle. Le temps n'est déjà plus où l'on rêvait de reproduire ses méthodes comme l'indique l'intitulé même de *L'économie rationnelle*, chère aux polytechniciens réformateurs, et que Divisia avait utilisé bien avant Guillaume pour titre de son ouvrage majeur²¹, primé par les deux Académies. Jean Ullmo, encore répétiteur d'analyse à Polytechnique, n'est d'ailleurs pas trahi par les frères Guillaume – tant dans l'ouvrage cité que dans sa conférence de février 1937, *Les problèmes théoriques de l'économie dirigée*, il affirme que *les deux défauts essentiels de l'économie contemporaine sont l'emploi de définitions vagues et de raisonnements par analogies purement verbales* et que leur remède est l'emploi de « modèles ». Mais il précise *en quoi les modèles de l'économie politique peuvent différer de ceux des sciences ordinaires et où ils doivent limiter leur ambition* – la démarche inductive propre « à la science positive », partant de l'observation et du repérage de relations quantitatives répétibles, généralisées en lois, puis en théories qui donnent à celles-ci une interprétation causale, présente dans le cas de l'Économie des difficultés (absence d'expérimentation par exemple) que l'usage des modèles, conçus comme des schémas comptables – peut aplanir. Ullmo récuse, avec Darmais, les recherches statistiques systématiques, « dans le genre de celles auxquelles a consacré sa vie M. Simiand », qui ne s'appuieraient pas sur la construction préalable de modèles. *Le modèle [dans les sciences sociales] correspond à l'hypothèse de travail des sciences ordinaires*. Jean Ullmo devait plus tard préciser ce rôle fondamental joué par les modèles dans la pensée scientifique en général dans un petit ouvrage d'épistémologie²² situé entre positivisme – *un objet scientifique n'est que l'intersection de relations répétibles* – et réalisme opératoire – *il n'y a pas de réalité préalable que l'on mesure – il y a une réalité qui naît du moment où elle est mesurée* – et très ouvert à la nouvelle idée de structure, dont on verra le rôle qu'elle a conféré au modèle. Dans la préface de l'un de ses derniers ouvrages²³, Jean Ullmo résumait tout l'apport des modèles à la science économique :

Les modèles sont indispensables, et il faut les multiplier. Chacun dans son formalisme mathématique rigoureux, permet de délimiter des hypothèses, de préciser des concepts, d'explicitier des conséquences, de reconnaître des convergences ou des incompatibilités. Ils abolissent donc les environnements indécis, les glissements de pensée, les actions contraires aux fins proclamées, les incohérences de projet ou d'acte. Leur multiplicité s'oppose à la tentation du mécanisme unique, de la solution parfaite : elle rappelle que l'extraordinaire complexité des actions et réactions économiques ne peut être passible d'un modèle exhaustif [...] Les modèles sont donc des instruments de pensée. On ne peut s'en passer, on ne doit pas s'y soumettre.

ÉPISTEMOLOGIE DES MODÈLES – LES PASSERELLES ENTRE MODÈLE LOGIQUE ET MODÈLE EMPIRIQUE

Les économistes n'ont jamais utilisé le terme de modèle avant 1930. Après 1935, le terme est dans toutes les bouches et sous toutes les plumes. C'est à la fois le mot et l'usage qui s'imposent en une seule décennie, dans des initiatives très nombreuses éclatées entre des disciplines et des lieux variés, qui dépassent notre exemple de l'économétrie française, et que supporte sans conteste une sorte de philosophie

²¹ F. Divisia [1927].

²² J. Ullmo [1969].

²³ J. Ullmo, *Le profit*, 1969, Paris, Dunod, Coll. Finance et Economie appliquée.

commune. Celle-ci aurait-elle quelque chose à voir avec l'ambitieuse entreprise des membres du Cercle de Vienne de reconstruire une science unitaire sur les principes d'une logique des modèles ?

Il y a eu controverse sur ce point comme en témoignent par exemple le petit ouvrage très polémique du philosophe Alain Bayou²⁴ publié à la fin des années soixante. Alain Bayou, au nom de la coupure Bachelardienne entre notion et concept, reprise dans un cadre structuralo-marxiste, refuse tout bonnement un tel accrochage de la notion « idéologique » de modèle en sciences sociales au pur concept métamathématique. Il soutient qu'un système formel est « une machine mathématique, une machine pour la production mathématique » et que *toute exportation hors du domaine propre à l'expérimentation mathématique est illégitime, si du moins on prétend garder la rigueur des propriétés du concept, et ne pas les dégrader en variantes d'une notion idéologique*. La notion de modèle empirique en sciences sociales n'est pas autre chose pour lui qu'une poudre aux yeux ou un objet idéologique de manipulation. Le propos n'est pas isolé et de nombreux intellectuels dénoncent dans le contexte post-soixante-huitard l'usage inconsidéré des modèles en sciences sociales.

À l'autre bout du spectre, on trouve des auteurs comme Leo Apostel qui, dans le cadre du colloque d'histoire et philosophie des sciences sur « Le concept et le rôle de modèle en mathématiques et dans les sciences naturelles et sociales »²⁵ proposent d'affaiblir la théorie de Tarski, pour faire sortir le concept de modèle du domaine intra mathématique et l'appliquer aux sciences empiriques, d'abord en faisant du modèle et de son prototype deux systèmes quelconques, qui peuvent être tous deux des structures algébriques (modèles dits algébriques), tous deux des langages ou théories (modèles dits syntactiques), ou encore une mise en relation d'un langage et d'une structure, algébrique ou non (modèles dits sémantiques), puis en généralisant les concepts d'isomorphisme entre deux structures, de satisfaction d'un langage dans un domaine, et de « transportabilité » d'un langage dans un autre qui sont respectivement au centre de ces trois formes de modèles. Une notion de modèle empirique – *model of data* – pourrait par exemple être conçue comme une interprétation descriptive "factuellement vraie" d'une théorie. On aboutit à une généralisation de la notion de modèle « tout sujet utilisant un système A qui n'est ni directement ni indirectement en interaction avec un système B pour obtenir de l'information sur B, utilise A comme modèle de B »²⁶. Cette position épistémologique serait plus tard celle de Kemeny, celle de Walliser [1977] ou encore celle de Thom.

Une position intermédiaire est bien représentée par un papier de Patrick Suppes au même colloque. Il accepte que

Le concept de modèle dans le sens de Tarski [soit] utilisé sans distorsion comme concept fondamental dans toutes les disciplines pourvu que soit respectée la distinction importante dont nous avons besoin [à savoir] qu'une théorie est une entité linguistique faite d'énoncés alors que les modèles sont des entités non linguistiques dans lesquelles la théorie est satisfaite.

Le concept logique s'applique alors à *toute théorie empirique précisément formulée [c'est-à-dire] mise sous forme d'une théorie axiomatisée de l'intérieur d'un*

²⁴ A. Badiou [1969].

²⁵ H. Freudenthal (ed.), 1961 On y trouve les interventions de P. Suppes et de L. Apostel.

²⁶ L. Apostel, in Freudenthal, 1961, p. 36.

cadre standard ensembliste. La condition d'une formulation axiomatique est forte, et bien rarement remplie par les modélisations développées dans les sciences empiriques. L'auteur dénonce la confusion ou inversion entre modèle et théorie, comme en statistique mathématique où le modèle désigne un ensemble d'hypothèses théoriques (des entités linguistiques) pris comme axiomes, ou comme en ingénierie où le «*modèle physique*» analogue au modèle réduit est substitué à la notion ensembliste. Les logiciens et épistémologues qui ont suivi cette position rigoriste sont majoritaires□ils ne s'interdisent pas de transporter la notion logique dans le domaine empirique mais se défendent de le faire dans n'importe quelle condition. Le plus souvent ils articulent l'idée de modèle avec celle de théorie axiomatisée. Position qui a constitué la base de la modélisation structurelle dans l'après-guerre, qui a nourri l'épistémologie des modèles de 1950 à 1980, et que l'on reconnaîtra aujourd'hui par exemple dans les écrits de Philippe Mongin [2003].

Mais on peut quitter le terrain de la philosophie normative pour celui de l'histoire positive, et répondre à la même question des rapports entre logique mathématique des modèles et pratique empirique des modèles que de nombreuses traces sont perceptibles d'un transport des débats de Vienne dans les sociétés savantes internationales et les *think tank* américains des années 1930 et 1940. Un premier fil conducteur propre à la tradition statistique part de la *Grammaire de la Science* (1892) de Karl Pearson, inspirée explicitement de la philosophie de Mach, et que l'on peut suivre jusqu'à la notion de modèle de population chez Fisher, et de modèle statistique chez Neyman et Pearson (fils). Le *Statistical Research Group* (SRG) fondé au début des années 40 dans le cadre du *Applied Mathematical Panel* (AMP) mis en place par Warren Weaver, et qui a eu trois antennes à Columbia, Berkeley et Princeton dirigées respectivement par Harold Hotelling, Jerzy Neyman, et Wilks, a prolongé ce brassage des statisticiens, des mathématiciens et des philosophes. Il a constitué aussi une pépinière pour les économistes de la nouvelle génération, et tout particulièrement celle de la future école de Chicago. De Wald à Savage en passant par Friedman, tous ont tous été marqués par cette expérience qu'ils ont prolongée après guerre dans les universités et des lieux comme la Rand Corporation et la Cowles Commission. Cette dernière institution a tiré sa force principale d'un grand nombre de séminaires et d'écoles d'été dans lesquelles les meilleurs savants américains et européens ont été invités. Un certain nombre d'entre eux furent ensuite recrutés par Cowles comme chercheurs ou consultants. Citons par exemple Wald, H.T. Davis, R. Frisch, G. Tintner, Jakob Viner, Oskar Lange, Trygve Haavelmo (élève de Frisch à Oslo), Tjalling Koopmans (physicien élève de Tinbergen et Frisch), L. Hurwicz ... À partir de 1933, pour un bon nombre d'entre eux, c'était plus qu'une opportunité de carrière, c'était l'occasion inespérée de fuir les persécutions des nazis, comme l'interdiction faite aux juifs d'enseigner. Plusieurs de ces européens apportent dans leurs bagages des savoir-faire et des épistémologies qui viennent des meilleurs centres européens, Londres, Goettingen, Vienne. C'est un second fil conducteur, dont un cas exemplaire est la trajectoire d'Abraham Wald (1902-1950). Né en Roumanie au sein d'une famille de juifs orthodoxes, Wald arrive en 1930 à l'Université de Vienne où il passe sa thèse de Mathématiques en 1931. Il y rejoint le séminaire fameux de Karl Menger (fils de Carl Menger) dans lequel vont intervenir les mathématiciens les plus brillants de cette période, ceux qui vont jouer un rôle clé en mathématique appliquée□Brouwer, Hahn, Von Neuman, Reidemeister, Tarski, Ulam. Les débats de ce séminaire sont reflétés par la revue *Ergebnisse eines Mathematischen Kolloquiums* dont Wald coédite (avec Gödel et Menger) les deux derniers volumes¹. Grâce à Menger, Wald donne des cours de mathématiques au banquier Schlesinger, travaille avec lui les équations d'économie mathématique de Walras et Cassel, et est

embauché par Morgenstern à l'Institut de Conjoncture que celui-ci dirige. Menger le présente au mathématicien Hahn, et l'introduit à l'axiomatique des probabilités en le faisant travailler sur les «collectifs» de von Mises et Popper. À la suite de l'assassinat de Schlick, c'est encore Menger qui aidera Wald à émigrer, l'été 1938, aux États-Unis, où il est accueilli à la Cowles Commission. Hotelling l'introduira ensuite à Columbia comme conférencier (1939-1940), assistant (1941-1944) puis professeur de Statistique Mathématique.

LA NOTION DE MODÈLE EN ÉCONOMÉTRIE STRUCTURELLE

Sous la direction de John Marschak, la Cowles Commission va orienter son programme de recherche sur la méthode économétrique. Dans une conférence de 1948, Tinbergen, un des acteurs de ce programme, cite Carnap comme ayant inspiré ses recherches sur l'induction et la probabilité. Le norvégien Trygve Haavelmo reconnut explicitement l'influence des idées du Cercle sur son œuvre et en particulier sur ce qui allait devenir le manifeste de l'économétrie, sous le titre *The probability approach in econometrics*, un texte d'une centaine de pages publié dans un supplément de *Econometrica* en 1944. Certes le titre et l'introduction mettent l'accent sur l'introduction de la probabilité, qui constitue une révolution dans la pensée économique. Mais la notion centrale de ce texte est celle de modèle

Les modèles (models) théoriques sont les outils nécessaires à nos efforts pour comprendre et expliquer les événements de la vie réelle. En fait, même une simple description et classification des phénomènes réels serait probablement impossible, sans une vision de la réalité qui se fasse à travers la structure de quelque système (schème) conçu a priori.

Pour résoudre la lancinante question de l'articulation entre approche théorique, approche formelle, et approche quantifiée, il faut absolument la médiation d'un modèle (comme l'écriront bien plus tard Morgan et Morrison) qui permette de mettre en correspondance les objets formels et théoriques que sont les variables et relations avec leurs équivalents empiriques. Ce modèle est un jeu d'équations simultanées dont certaines traduisent des équilibres et des égalités comptables tandis que d'autres traduisent les comportements communs des acteurs, ou les relations fondamentales, autonomes.

Mais il y a là plusieurs difficultés. La première est de bien identifier ce qu'est une relation autonome, ou encore structurelle, au sens où elle décrirait le fonctionnement fondamental du système économique, indépendant des circonstances locales. Reprenons l'analogie de Frisch : la relation entre position de l'accélérateur et vitesse d'une voiture n'est pas une relation autonome : elle dépend de la charge de la voiture, de la pente de la route, du vent... La relation entre papillon des gaz et puissance du moteur est par contre autonome, et propre à caractériser le véhicule placé dans diverses circonstances. Isoler les relations autonomes qui caractérisent la structure propre d'un système n'est pas une mince affaire en économie. On a cru longtemps le faire avec des équations décrivant le comportement des consommateurs et producteurs, mais ces équations ignoraient que ces comportements répondaient et anticipaient ceux des autorités étatiques ou supranationales.

Une seconde difficulté est de savoir passer des variables théoriques aux variables observables. Car le modèle est à deux faces : du point de vue théorique, c'est un simple *jeu de restrictions sur les variations jointes d'un système de variables* qui excluent – absolument si le modèle est algébrique, et probablement s'il est stochastique – un certain

ensemble de valeurs possibles. Mais ce modèle théorique n'a de signification économique qu'associé à un plan d'expérience, ou encore un modèle de données, qui fait correspondre un système de variables observationnelles aux variables théoriques. Ces variables observationnelles se distinguent des variables théoriques à la fois par les erreurs de mesure et par le fait que, au lieu d'avoir un plan d'expérience qui correspondrait à une sorte d'expérimentation idéale où «Les phénomènes peuvent être isolés artificiellement d'autres influences» que celles des causes principales qui intéressent l'économiste – c'est la fameuse hypothèse du *ceteris paribus* = toutes choses égales par ailleurs qui caractérise la théorie classique – une loi de demande est une fonction qui relie prix et quantités d'un bien dans un monde où les autres prix et quantités, les goûts, les techniques ne changent pas – l'économiste ne dispose que d'observations «Du flot d'expériences que la Nature produit sans arrêt», avec un grand nombre d'interactions non contrôlées. En bref, pour Haavelmo, le modèle théorique est un jeu de restrictions qui simule la sélection naturelle dont rend compte le modèle de données.

Pratiquement, les équations comportent donc un terme aléatoire qui rend compte à la fois des erreurs de mesure, des erreurs d'échantillonnage de l'observateur et de «Dame Nature», et des variabilités des comportements individuels autour de la relation moyenne. Le modèle, c'est l'ensemble des hypothèses qui sont formulées sur ces relations et sur ces termes d'erreurs dans la phase de spécification. Tester une théorie, c'est la confronter aux observations statistiques par l'intermédiaire de ce modèle. C'est plus précisément tester au sens statistique les hypothèses probabilistes du modèle qui portent sur la loi conjointe des termes d'erreur. Toute la complexité de l'adéquation d'une théorie à un donné empirique est ainsi réduite à l'opération plus délimitée d'un test d'hypothèses probabilistes.

Cette approche permet à Haavelmo de contourner certaines difficultés apparues dans les premières tentatives économétriques. Dans l'estimation d'une loi de demande par exemple, le décalage entre le *path* des données d'observation (prix et quantités) qui résultent d'un plan d'expérience et lois théoriques d'offre et demande définies *ceteris paribus* ouvrirait une crise d'identification des paramètres de ces lois. Le recours au modèle probabiliste tourne cette difficulté en faisant intervenir la décision des agents qui s'interpose entre conditions des choix et résultats collectifs tangibles. Il s'agit, on le voit, d'une réinterprétation de la causalité par le paradigme de la *décision*, ensemble de concepts de méthodes et d'acteurs (au sens de Kuhn) qui est introduit à la même époque en statistique mathématique par les travaux de Wald, de Newman et Pearson, en théorie des choix rationnels et en théorie des jeux par Von Neumann et Morgenstern, dont la *Theory of Games and Economic Behavior* paraît en cette même année 1944, et qui, en économétrie, produit une médiation entre variables indépendantes et dépendantes. La cause – un certain état du monde – ne produit plus un effet nécessaire, mais un effet rationnel, voulu et décidé par les acteurs en fonction de leur systèmes de préférences. C'est ce même paradigme qui, pour Haavelmo, fournit le principe fondamental de l'introduction de l'aléa dans la loi économique.

Le texte de Haavelmo devint vite le texte-programme de la *Cowles Commission*. Il l'était déjà avant sa publication pour avoir été discuté dans ses séminaires. Le programme de recherche impulsé par le directeur Jacob Marschak est le prolongement direct du manifeste de Haavelmo, et met l'accent sur les méthodes statistiques de l'économétrie. La monographie de Koopmans [1950] présente les principaux résultats de

ce programme, pour l'essentiel relatifs à la mise au point de critères d'identification et de méthodes d'estimation pour les modèles à équations simultanées²⁷. Mais celui-ci ne semble pas remporter un grand succès dans l'immédiat. L'isolement et l'élitisme des chercheurs de la *Cowles Commission* se heurtent au public des économistes dont la culture mathématique est encore très faible et qui s'est montré tout particulièrement rétif vis-à-vis du calcul des probabilités. Le mathématicien Edwin Wilson²⁸, pourtant membre de *l'Econometric Society*, juge cette approche

extrêmement abstraite et métaphysique et pédagogiquement suicidaire (...). Il y a un groupe d'économètres qui sont bien entraînés en mathématique, et qui ont apparemment choisi d'écrire les uns pour les autres plutôt que pour les économistes.

Cet isolement joue aussi bien par rapport aux économistes académiques que parmi ceux qui sont engagé auprès des entreprises ou auprès des agences étatiques. La célèbre controverse avec le NBER²⁹ sous la forme d'un échange très acerbe entre Koopmans et Vining en témoigne. Le nouveau directeur de la Cowles Commission, Tjalling Koopmans publie une critique assez féroce des méthodes empiristes du NBER, illustrée par l'étude de Burns et Mitchell sur les Business Cycles (1946), et épinglées dès le titre comme mesures sans théorie³⁰. Accusé d'en rester au stade Keplerien de la discipline (par Koopmans-Newton), le NBER répond par la plume du jeune Vining en dénonçant l'amalgame des économètres entre théorie et théorie néoclassique, l'individualisme méthodologique qui domine leurs travaux (auquel il oppose un point de vue institutionnaliste et holiste), l'illusion d'avoir saisi des «relations autonomes» invariantes, l'emphase excessive mise sur la théorie statistique des sondages et de l'inférence, et l'inefficacité politique de ces recherches.

De fait, la domination du paradigme de la Cowles Commission sur la méthodologie économique³¹ va s'imposer pour trente ans non pas tant à cause de ses travaux de pionniers, que grâce aux nouvelles conditions de régulation des économies après guerre. La Pax americana³² réorganise l'économie mondiale sous la domination du dollar et d'une recherche marquée par une continuité du complexe militaro-industriel instauré pour la seconde guerre mondiale dans la période de guerre froide qui lui succède. L'économétrie trouve son salut dans la demande des États d'instruments d'expertise et de régulation qui leur permettront de prolonger l'expérience du New Deal par des politiques s'appuyant à la fois sur l'approche keynésienne, sur la construction de

²⁷ Les raffinements développés dans ce cadre furent très nombreux entre 1950 et 1970 : listons simplement les théories de l'identification (Koopmans et Hood 1953), les techniques d'estimation de modèles à équations simultanées (LIML de Girshick, Doubles Moindres carrés de Klein et Theil), les moindres carrés généralisés d'Aitken (dans le cas où la matrice de variance-covariance des erreurs est quelconque), les tests et corrections de l'hétéroscédasticité (Glejser, White...), le traitement de l'autocorrélation (tests de Durbin et Watson, méthode itérative de Cochrane et Orcutt), les travaux de Koyck et Fiedmann sur les anticipations adaptatives et les modèles à retard échelonnés, le traitement de l'erreur sur les variables par Frisch (1934), Wald (1940), Reiersöl (1945), Bartlett (1949), et Durbin (1954), les modèles probits, logit et tobits de variables qualitatives ou censurées... sans oublier les travaux sur la résolution des modèles et l'étude de leurs propriétés dynamiques.

²⁸ E. Wilson, Book Review, *Review of Economics and Statistics*, 1948, p. 173-174.

²⁹ National Bureau of Economic Research.

³⁰ Koopmans T.C. [1947].

³¹ Sur l'histoire de la Cowles Commission (puis Fondation) voir les rapports d'activités et Christ, 1952

³² Armatte [2004b]

systèmes de comptabilité nationale, et sur des services de prévision et de planification. Frisch et Haavelmo s'y consacrent en Europe du Nord, les ingénieurs économistes et statisticiens français le font également à la fin des années 1950 au Service des Etudes Economiques et Financières puis à la Direction de la Prévision.

Si l'économie mathématique se concentre principalement sur le programme de la Théorie de l'équilibre général auquel l'apport de Debreu donne une forme purement axiomatique, la notion de modèle s'identifie alors pour l'économie à la forme particulière des modèles macroéconométriques qui s'imposent dès les années 1950 aux Etats-Unis avec le modèle de Klein, revu dans Klein et Goldberger (1955). Sept autres modèles ont vu le jour entre 1950 et 1965 dont le célèbre modèle de la Brookings à plusieurs centaines d'équations qui a occupé plusieurs équipes d'économistes et statisticiens pendant dix ans (Dusenberry, Klein...) ³³. En Europe aussi, les modèles macroéconométriques sont établis et utilisés dans la construction des budgets et dans la planification (Bernard et Cossé 1974, Artus 1994, Desrosières 1997), dès 1930 aux Pays-Bas (Tinbergen), bien plus tard en France (Herzog et Olive, 1966) ³⁴, à cause peut-être d'un certain retard de la recherche économétrique isolée dans quelques grandes écoles en attendant que les études économiques s'émancipent de la tutelle des facultés de Droit, à cause surtout d'une tradition antérieure de projection des comptes par le biais des tableaux d'entrée-sortie, variante comptable des tableaux d'*input-output* de Leontief qui sévit dans les institutions de prévision et planification. L'économétrie, objet de contentieux entre la CC et les économistes de l'École de Chicago (Friedman), est par ailleurs un outil important de régulation des échanges internationaux pour les organismes (FMI, BM) chargés du nouvel ordre monétaire international après 1944, puis dans la mise en place du «Washington consensus» et de la politique d'ajustement structurel dans les pays en voie de développement dans les années 1970 (cf. [Delazay et Garth, 1998]).

Pour relativiser cette irruption du paradigme de l'économétrie structurelle dans les années 1950 dans certains lieux privilégiés de la recherche et des hautes sphères de l'État, il est intéressant d'évoquer l'enquête lancée par Maurice Fréchet en 1946 *sur les possibilités et limites de l'application des sciences mathématiques, et en particulier du calcul des probabilités, à l'étude des phénomènes économiques ou sociaux*, un sujet dit-il «très controversé où s'affrontent les points de vue les plus divers, mais où ceux qui prennent part à la discussion ne se comprennent pas toujours très bien». Maurice Fréchet, malgré la naïveté apparente de la question, n'en était pas à son premier «coup de gueule» et «coup de force» pour imposer, pas le biais d'une anodine enquête, un peu d'ordre dans les usages de la statistique mathématique comme il l'avait fait pour la corrélation dans les années 30 et pour l'estimation à deux reprises, en 1940 et 1948. Sur cette question des applications économiques, il avait souhaité au départ deux enquêtes, l'une s'adressant aux économistes «ayant reçu une formation mathématique avancée», l'autre aux économistes classiques. Seule la première fut lancée ³⁵, et les résultats publiés

³³ Cf. Bodkin *et alii*, [1991].

³⁴ Qui créent ZOGOL, auquel succèdera DECA (Billaudot 1971), STAR (Boyer 1974), COPAIN (Dehove 1981), GAMA (Courbis 1971), FIFI (Vème et VIIème Plan, Aglietta 1973), DMS (VIIIème Plan, Fourquet 1978), METRIC (Artus 1977), DEFI (Villa 1982), et plus récemment ICARE (IPEECODE), INTERLINK (OCDE), SACHEM (CEPII), COMET et ATLAS (DP), HERMES-France (CEE-Centrale-Paris)

³⁵ Fréchet a obtenu les réponses de Harold Hotelling (Univ. of North Caroline), Oscar Anderson (Kiel), Irving Fisher (New Haven, Connecticut), J.B.D. Derksen (La Haye et ONU), Henri Eyraud (ISFA Lyon), Bruno de Finetti (Trieste), Jacques Rueff (Paris), Jan Tinbergen (La Haye), L.V.Furlan (Bâle), Luigi

par la Revue et le Bulletin de l'*Institut International de Statistique* (cf. [Fréchet 1946 et 1947]). Or ces résultats font bien apparaître, même parmi les seuls économistes de culture mathématique, un grand embarras et une grande difficulté à définir une méthodologie précise de traitement formel des données économiques. Le niveau de généralité du discours de la méthode reste décevant et relève parfois de ce que certains ont appelé la philosophie spontanée des savants à la petite semaine. La synthèse de Fréchet se résume à peu de choses : l'usage des mathématiques permet une précision de l'expression qui ôte toute ambiguïté aux définitions puis aux énoncés, ensuite elle permet « une économie d'encre, de papier et de pensée », enfin elle permet de « saisir des relations compliquées entre un nombre infini (?) de quantités ». Quand Fréchet distingue trois modes principaux des mathématiques en économie : l'économie mathématique qui établit des relations générales entre quantités, l'économétrie qui les rend susceptibles de vérifications numériques, et « l'économie stochastique » qui traite la variation par la notion de variable aléatoire, on voit bien que Fréchet n'a pas compris que l'économétrie moderne est stochastique : sa synthèse dit autant sur l'enquêteur que sur les enquêtés.

La seule réponse construite et cohérente à la question de Fréchet est celle de Marschak : si l'on veut à la fois *connaître* la structure d'une économie (en combinant connaissance a priori et après observations) et *prévoir* stochastiquement les effets d'un changement structurel de politique économique, ce qui serait le double objectif de la science économique, il faut construire un « modèle structurel ».

Comment présente-t-il cette notion ? Par un système d'équations de la forme :

$$[1] \quad \begin{cases} \sum_h [y'(t), y'(t-1), \dots; z', \dots] = u_h \\ y'(t) - y(t) = v \\ z' - z = w \end{cases}$$

dans lequel y est le vecteur des variables endogènes à expliquer, z le vecteur des variables exogènes, et y' et z' désignent des vraies valeurs entachées d'erreurs v et w , tandis que u_h est l'erreur aléatoire sur l'équation numéro h qui traduit le caractère stochastique du comportement humain. Les 3 aléas sont liés par une densité de probabilité conjointe $f(u, v, w, \dots)$ de paramètre \dots . Une structure du modèle est une solution $\{a, \dots\}$ qui génère ou explique la distribution conditionnelle des variables endogènes aux temps $t, t-1, \dots$ pour des valeurs de z fixées.

Résoudre ce modèle c'est dans le cas stochastique, mettre le modèle sous la forme réduite d'une distribution conditionnelle :

$$[2] \quad g(y(t), y(t-1), y(t-2), \dots; z; \dots) \quad \text{où } \dots \text{ est le vecteur des paramètres.}$$

C'est cette forme [2] qui est intéressante pour juger des effets d'une politique économique puisqu'elle définit la loi des variables observables pour certaines variables de commande, tandis que les paramètres de la forme structurelle sont souvent inobservables. Mais Marschak insiste sur le fait que l'estimation directe des paramètres \dots de la forme [2] – qu'il assimile à « la météorologie statistique d'aujourd'hui » –

Amoroso (Rome), V. Rouquet la Garrigue (Bordeaux), Jacob Marschak (Chicago), René Roy (Paris), Maurice Allais (Paris), Georges Darmois (Paris), Lucien Féraud (Genève), K.-G. Hagsroem (Stockholm), Bernard Chait, Georges et Edouard Guillaume, ce qui représente un joli panel des économistes mathématiciens et statisticiens du moment.

allusion aux baromètres économiques utilisés pour rendre compte des *business cycles* – n'est pas suffisante car si la structure change (contrôle des prix par exemple) les valeurs de β ne sont plus valables. Il est donc recommandé de recourir à une «*estimation structurelle*» en dérivant la structure $\{a, \beta\}$ de β . Mais cela n'est possible de façon unique que sous certaines conditions *d'identification*. Un changement de structure peut alors être répercuté sur le paramètre β , et le modèle permet de «*prédire stochastiquement les effets de ce changement de structure*».

La mise en rapport de cette économétrie structurelle avec le structuralisme des années 1950 et 1960 peut sembler abusive. Mais le structuralisme, tout autant dans sa version mathématique que dans les sciences sociales à la suite des travaux de la linguistique puis de l'anthropologie structurales a joué un rôle non négligeable dans le développement des modèles, dans la mesure où la notion de structure a été systématiquement associée à celles de système et de modèle. La similitude entre structures sociales ou mentales et structures mathématiques est constatée par Dieudonné et Piaget dès 1952, et Lévi-Strauss reprend cette idée en 1954, appelant à des «*mathématiques humaines qui veulent résolument échapper au désespoir des grands nombres*»³⁶. La sémiologie telle que Roland Barthes la constitue dans ses *Éléments* et que la développent le Foucault des mots et des choses et Umberto Eco, propose une réflexion d'ensemble sur tous les systèmes de signes, qui prolonge la réflexion du Cercle de Vienne sur la science comme langage. Linguistique structurale et sémiologie ont séparé la Langue comme système de la Parole comme pratique, une séparation reprise par toutes les versions du structuralisme, y compris celles qui se sont appliquées aux modèles et qui ont privilégié syntaxe et sémantique et exclu les acteurs et les usages³⁷.

CRISE DE LA MODÉLISATION STRUCTURELLE

L'effondrement et l'abandon du système des changes convertibles mis en place à Bretton-Woods, la décision de Nixon de suspendre la convertibilité or du dollar (1971), les deux chocs pétroliers, et la cassure qu'ils impliquent à partir de 1973 dans la croissance inflationniste continue des vingt années précédentes, faisant succéder la stagflation à l'inflation, marquent la fin de la modélisation structurelle en économie. Les gros modèles macroéconométriques s'adaptent mal à ce nouveau contexte. La précision des prévisions est trop souvent inférieure à celle que donnent de simples autoprojections des séries par des méthodes autorégressives, les modèles VAR proposés par Sims. On critique le coût de ces modèles

pour compenser la pauvreté patente des données disponibles... aucun domaine de recherche empirique n'a mobilisé une machinerie aussi massive et sophistiquée pour aussi peu de résultat [Léontief AER 1971], et leur parti pris : les économètres ne sont que des ventriloques ayant trouvé dans les modèles un moyen coûteux de faire imprimer leurs préjugés par un ordinateur [Charpin, Futurable, 1983].

Le coup de grâce est donné par les critiques théoriques qui s'abattent sur les fondements de ces modèles. La première qui vient des monétaristes s'attaque au moteur central de ces modèles, la boucle prix-salaires, et sa forme la plus simple qui est la

³⁶ Cf. Armatte *et al.* (les Messaches), [1989].

³⁷ Sur les liens entre modèles et structures, cf. [Foucault, 1966] [Boudon, 1968] [Badiou, 1969] [Bourdieu, 1976] [Armatte, 1995, chap. 2].

relation de Phillips, relation inverse entre taux d'inflation et taux de chômage, qui permettait aux keynésiens d'arbitrer entre ces deux maux. Friedman et Phelps avaient supposé que les valeurs observées du taux de chômage et des prix ne pouvaient s'écarter des valeurs d'équilibre qu'à très court terme, sous l'effet de chocs monétaires et d'une erreur d'anticipation des agents, trompés par les autorités. La seconde critique est celle de Lucas qui s'empare de la théorie des anticipations rationnelles pour renforcer les conclusions des monétaristes : si les autorités augmentent par surprise la masse monétaire, les agents, croyant que le prix des biens a augmenté, augmentent la production de ces biens, et donc l'emploi : il y aura hausse des prix et baisse du chômage comme sur la courbe de Phillips, mais les dits agents constatant qu'ils ont été trompés reviendront vite au niveau d'équilibre de la production et de l'emploi avec des prix plus élevés. La vraie courbe de Phillips de long terme est en fait verticale, et les variations du chômage autour du taux de chômage naturel ne proviennent que des défauts de l'information des agents sur la masse monétaire. Les « Nouveaux classiques », dont Robert Lucas et Thomas Sargent sont les chefs de file, généralisent ce raisonnement. Faisant l'hypothèse que l'économie est dans un équilibre de concurrence parfaite et réalise un optimum de Pareto, ils supposent que les agents rationnels (en fait un « agent représentatif ») disposent de toute l'information disponible, y compris le modèle des pouvoirs publics qu'ils anticipent et auquel ils s'adaptent en restant dans le cadre de cet équilibre, ce qui change la structure du modèle. Celle-ci n'est pas invariante par rapport aux politiques, et l'on ne peut plus s'appuyer sur un soi disant modèle structurel pour édicter les règles d'une politique efficace, car les prévisions effectuées avec de tels modèles seront systématiquement erronées du fait de l'anticipation des effets de toute politique économique. La politique de l'Etat elle-même doit être rendue endogène puisqu'elle aussi dépend de ces anticipations.

À l'inverse de cette spécification requise plus complexe incluant les anticipations, la critique de Sims rejette toute spécification a priori d'un modèle qui se fonde sur de trop vagues considérations théoriques pour décider que telle variable est exogène, c'est-à-dire joue un rôle causal, et que telle autre n'en joue aucun. Il impose que toutes les variables soient *a priori* considérées et que des tests d'exogénéité et des tests de causalité, au sens de Granger³⁸, soient pratiqués sur les séries empiriques avant d'opter pour une écriture du modèle. Dans cette même tradition anglaise des modélisations de séries temporelles par des processus de type autorégressifs (AR) ou moyenne mobile (MA) une attention particulière a été portée dans les années 1980 à la non-stationnarité et à une cointégration des séries qui était à l'origine de corrélations abusives. La solution proposée, c'est un modèle dit à correction d'erreur dans lesquels on estime simultanément une relation stable de long terme et une dynamique de court terme calée sur la précédente. Enfin les doutes les plus sérieux ont été émis sur le résultat à long terme de l'usage systématique des tests d'hypothèse. Comme l'ont fait les psychologues depuis de nombreuses années³⁹, des économètres ont dénoncé les pratiques de recherche de type *data mining* dans lesquelles on ajustait successivement toute une série de

³⁸ La définition de Granger, *Econometrica*, 1969, est fondée sur la prédictabilité des séries et combine asymétrie temporelle et inégalité de l'information : si une série X_t contient, à travers ses valeurs passées, une information qui améliore la prédiction de Y_t , et si cette information n'est contenue dans aucune autre série utilisée pour calculer le prédicteur, alors on dit que X_t cause Y_t . En pratique, pour des séries stationnaires, on teste que les coefficients de X_{t-1}, X_{t-2}, \dots sont significatifs dans l'équation linéaire exprimant Y_t en fonction des valeurs passées de X et de Y et que ceux de Y_{t-1}, Y_{t-2}, \dots ne le sont pas dans l'équation linéaire exprimant X_t en fonction des valeurs passées de X et de Y .

³⁹ Cf. le dossier sur les tests d'hypothèse dans le *Journal de la SFDS*, 2005, Vol. 145, N°4.

modèles sur les mêmes données jusqu'à ce que ça marche⁴⁰; Or, pour des raisons éditoriales et pseudo-scientifiques, ne sont publiés que des modèles dans lesquels les relations sont significatives, ce qui produit un biais de publication d'autant plus important que la notion de seuil de signification des tests est totalement dénaturée par cette stratégie. Bien sûr on a trouvé quelques parades comme le *general to specific modelling* de Hendry ou, plus radical encore, l'abandon complet de la statistique inférentielle classique □ les modèles d'équilibre général calculable, très utilisés par la Banque mondiale et le FMI, ne sont plus estimés sur données historiques mais calibrés sur une base de données récentes.

La modélisation économétrique des années 1990 et 2000 n'a plus grand-chose à voir avec la modélisation structurelle des années 1960. Les relations du modèle ne sont plus fondées sur une théorie macroéconomique, mais sur des principes de rationalité des agents et sur des règles d'optimisation de leurs comportements et de leurs anticipations. Soit on a cherché à sauver les grands principes de la modélisation structurelle en complexifiant terriblement les modèles pour y intégrer les anticipations, les contraintes d'équilibre, les dynamiques de croissance, et dès lors il a fallu abandonner l'idée d'un modèle du grand Tout pour se contenter de modéliser seulement certains mécanismes. Soit on a délibérément choisi de faire des petits modèles d'équilibre de type maquette, davantage orientés vers la simulation que vers la prévision.

NOUVELLES CARACTÉRISTIQUES DE LA MODÉLISATION DANS LES SCIENCES

Or il se trouve que l'évolution de la macro-économétrie est assez typique d'une évolution plus large de la modélisation dans les sciences physiques comme dans les sciences sociales depuis la seconde guerre mondiale. Les travaux d'histoire des sciences menés sur le XX^e siècle ont mis en évidence le rôle majeur, et trop souvent minimisé dans les recherches purement épistémologiques, des conditions spécifiques à la seconde guerre mondiale dans l'explosion des mathématiques appliquées, dans la réorganisation de la recherche autour de nouveaux pôles académiques et dans des *think tank* comme la Cowles Commission et la Rand Corporation, avec des moyens et des conditions sans mesure avec la période des années 1930 □ rapprochement des recherches universitaires, industrielles et militaires, forte interdisciplinarité, programmes de recherche opérationnelle orientés par des problématiques d'optimisation, nouvel intérêt pour les systèmes hommes-machines, contrainte forte d'aide à la décision⁴¹. De nouvelles mathématiques sont apparues, assez différentes des équations différentielles de la mécanique classique qui avaient d'abord servi de base de modélisation pour les sciences sociales, comme on l'a vu en économétrie □ L'algèbre des groupes, la théorie des jeux, la théorie des préférences, la programmation linéaire, la programmation dynamique, la théorie des graphes, les tests séquentiels forment autant de nouveaux domaines d'une mathématique appliquée⁴². Mais surtout, l'ordinateur, passé de machine à calculer, à machine à traiter de l'information, puis moyen de simulation de systèmes complexes, joue un rôle qui devient tout à fait central dans l'articulation du modèle avec d'une part la théorie et d'autre part les données. Grâce à l'ordinateur en effet, les données traitées peuvent être très nombreuses et devenir aussi importantes que le fondement théorique du modèle. Dès lors le modèle n'est plus seulement une structure mathématique qui

⁴⁰ Cf. par exemple [Charemza et Deadman, 1997], ou [Spanos, 2004].

⁴¹ Cf. [Dahan et Pestre, 2004] □ [Armatte, 2004 (b)].

⁴² Cf. [Armatte *et al.*, 1989] □ [A. Dahan, 1996].

représente une théorie, il devient une double représentation partielle et orientée (par l'objectif qu'on se donne, et par l'état du système d'observation et de mesure) d'un système physique ou social, par un système formel hypothético-déductif et un système d'information et de mesure qui lui sont homomorphes. La correspondance entre variables et relations théoriques d'une part, et valeurs empiriques et formulations mathématiques des relations d'autre part étant soumise à de nombreuses conditions et approximations. Le modèle a cette double face d'un modèle théorique et d'un *model of data* qui fait l'hypothèse d'un mode de production des données. Il occupe alors un rôle de médiateur entre la théorie et les données comme on l'a vu en économétrie structurelle et comme l'ont bien analysé Morgan et Morrison (1999).

Dans certains cas, le traitement de ces données peut même jouer un rôle heuristique et inductif important qui se suffit à lui-même. Il peut remplacer une détermination mathématique des solutions de systèmes équations comme dans la méthode de Monte Carlo, voire remplacer une approche théorique manquante ou incomplète. Dans le cas par exemple de la mise au point de la bombe H, Gallison a montré que les connaissances en physique devenaient insuffisantes pour comprendre et prévoir l'ensemble des phénomènes de la propagation du rayonnement, de l'hydrodynamique des matériaux en explosion, etc., et que la simulation sur ordinateur devenait la seule solution pour combiner les différents savoirs et données qui sont en jeu. Le modèle n'est plus un système formel qui représente un système physique bien défini et délimité pour lequel on a des lois valables *ceteris paribus*. Le modèle devient un mécanisme d'intégration de données produites par des sous systèmes d'information. Le modèle, ensemble d'équations, d'interfaces, de données qui s'est transformé en logiciel, constitue un système de substitution au système réel, dont on n'a pas de théorie complète, et qui permet de faire des expériences fictives, pour comprendre le jeu complexe de ses interactions. Et ces expériences fictives constituent bien une méthodologie de rechange, par rapport à la méthode hypothético-déductive aussi bien que par rapport à la méthode expérimentale, dans le cas des systèmes complexes⁴³.

Dans le domaine du climat, de l'économie mondiale, de l'environnement, la complexité provient à la fois du nombre d'éléments interdépendants du système, de la nature même de ces interactions non linéaires à base de boucles de *feedback*, de la nature hétérogène de ces objets à la fois humains et non humains, de la floraison de théories non unifiées qui sont en jeu, mais aussi de la grande disparité des échelles de temps et d'espace qui doivent être prises en compte. Dès lors, les modèles composites constitués par un couplage de sous-modèles hétéroclites ne ressemblent en rien dans leur construction, leurs propriétés et leurs usages aux modèles théoriques de la science unifiée dont ont pu rêver les scientifiques et les épistémologues. Pour rester en économie, il y eut dans les années 1970 une tentative de description et simulation de notre système monde au travers de modèles dérivés d'une approche de dynamique des systèmes inaugurée par Jay Forrester au MIT, que celui-ci mit au service du programme de recherche du Club de Rome. Son modèle *world3* produisit des simulations qui servirent de soubassement au célèbre rapport des époux Meadows sur les limites de la croissance⁴⁴. L'objet «monde» ainsi simulé plutôt que modélisé était bien un objet complexe au sens précédent et cette forme de modélisation intégrée à base de plusieurs sous systèmes (populationnel, industriel, agricole, environnemental, énergétique) constitués chacun de chaînes causales avec bouclages de rétroaction, quoique décriée

⁴³ Cf. [Gallison, 1996] [Armatte et Dahan, 2005].

⁴⁴ Cf [Forrester, 1971 ; Meadows, 1974].

pour son simplisme et son écart important aux théories économiques dominantes de la croissance équilibrée, a servi de prototype à toute une tradition de modélisation intégrée du changement climatique dans les années 1980 et 1990. Dans cette tradition on trouve plusieurs familles de modèles. Les climatologues ont d'abord construits, sur la base des modèles météo, des modèles de circulation générale de l'atmosphère (GCM) qui associent des équations de dynamiques, de physique et d'échanges chimiques à l'intérieur et entre les différentes mailles d'un découpage vertical et horizontal de l'atmosphère. Pour de tels modèles la finesse de ce maillage, la prise en compte de phénomènes d'échelles très variées dans l'espace (des nuages au cosmos) et dans le temps (de la seconde à plusieurs années), ont davantage compté que les lois théoriques en assez petit nombre de la physique et de la dynamique, et seuls de gros ordinateurs ont été capables d'intégrer les connaissances très diverses de ces phénomènes. La prise en compte des interactions entre l'atmosphère et les océans a encore complexifié le modèle global — le couplage des sous systèmes, réalisé soit dans des équations théoriques, soit dans des jeux de paramétrisation et de façon informatique pas toujours très transparente a été une étape difficile mais fondamentale.

De plus les simulations faites à l'aide de ces modèles sont très souvent faites pour des situations irréalistes et simplifiées tout à fait fictives comme par exemple le «forçage radiatif de la nébulosité» qui suppose les nuages instantanément transparents au rayonnement. Les données numériques de départ ne sont pas davantage réalistes car elles proviennent de sorties d'autres modèles ou de diverses bases de données qui ont été harmonisées et calibrées. La validation des modèles est elle-même assez peu conforme au dogme habituel de la confrontation avec des données observées puisque les projections se font à un horizon d'un siècle. La confrontation se fait davantage entre les différents modèles eux-mêmes qui sont produits par les différentes équipes de recherche.

Mais dès lors que les travaux de l'IPCC⁴⁵ confirmaient la nature anthropique de la dérive climatique, l'intégration de sous modèles énergétiques et économiques fut un nouveau défi. On a vu fleurir des modélisations propres au sous-système économique, dont les deux grands types sont d'une part les modèles d'économistes dits de croissance optimale inspirés des premiers modèles macroéconomiques non keynésiens de Ramsey (1928), d'autre part les modèles d'ingénieurs d'analyse d'activité fondés sur des matrices *input-output* et dont la théorie remonte aux travaux de Leontief (1941) et Koopmans [1950]. Dans le premier cas, on traite d'une économie à un seul bien produit et consommé par une population stable et homogène représentée par un agent représentatif, et l'on cherche le partage épargne consommation à chaque pas de temps qui maximise l'utilité inter-temporelle de cet agent. Un auteur comme Nordhaus a développé dès 1974 à la Cowles Commission des modèles de ce type pour contrer les conclusions du rapport Meadows, puis, en le complétant par un module climatique simplifié, pour évaluer les politiques de réduction des gaz à effet de serre⁴⁶. Dans le second cas, on se donne un certain nombre d'activités ou modes de productions concurrents ou successifs pour lesquels un tableau de coefficients techniques définit les outputs produits avec certaines quantités d'inputs. Cette analyse *input-output* due à Leontief a été adaptée par Koopmans à des questions de transport ou d'allocation de

⁴⁵ L'IPCC (*Intergovernmental Panel for Climate Change*, GIEC en français), créé en 1988, regroupe les chercheurs de plusieurs centaines de laboratoires répartis sur la planète, et ses réunions aboutissent à des protocoles d'action concertée entre les Etats, comme celui de Kyoto en 1997.

⁴⁶ Cf. la présentation du modèle DICE publié dans *Science* en 1992 par Nordhaus.

ressources optimales en y rajoutant une fonction-objectif à optimiser, elle a profité des méthodes de résolutions de programmes linéaires (en particulier la méthode du simplexe) mises au point au Pentagone par Dantzig, et Von Neumann. Les modèles de projection énergétique, comme le modèle MARKAL développé par une communauté travaillant en réseau sous les auspices de l'Agence Internationale de l'Energie, sont souvent de ce type. Ils présentent l'inconvénient de nécessiter de nombreuses données techniques mais sont davantage capable de simuler des politiques énergétiques alternatives.

Ces modèles économiques servent de cadrage à des calculs de coût-avantage ou coût-efficacité des impacts du changement climatique et des politiques de lutte et adaptation, dans la tradition du calcul économique. Le couplage des modèles atmosphériques et des modèles économiques et sociaux s'est produit sous la forme de modèles d'évaluation intégrée du type MARKAL, DICE dans lesquels on part d'un de ces modèles économiques et on incorpore un modèle réduit climatique. Le modèle IMAGE est un autre modèle d'évaluation intégrée développé par le laboratoire hollandais RIVM, dans la continuité du modèle Word3 du club de Rome. Il est constitué par l'assemblage de différents modules – population, économie mondiale, offre et demande d'énergie, couverture végétale, qui définissent les émissions de gaz à effet de serre sur la base de scénarios de développement pour les cinquante prochaines années issus des travaux de l'IPCC (SRS Report). Les modules de circulation atmosphérique, terrestre et océaniques permettent de passer des émissions aux concentrations, et au changement climatique qui en résulte. Un dernier groupe de modules traite alors des impacts de ce changement climatique en retour sur les différents sous systèmes naturels et socio-économiques. Ces *Interlaken Assessment Models*, qui complètent les *Earth System Models* construits à l'inverse autour d'un GCM sont les produits d'une nouvelle philosophie de la modélisation, inventée dans des lieux comme l'IIASA de Vienne. Ce sont des assemblages assez hétéroclites de modules hétérogènes, dans la connaissance théorique et chiffrée des phénomènes en jeu, dans les échelles et domaines de validité, produits par des communautés aux cultures différentes. Le couplage de ces sous modèles pose donc de redoutables questions théoriques, souvent contournées par des stratégies complexes de paramétrisation.

Mais surtout, ces modèles sont des objets en perpétuelle évolution, portés par des communautés de modélisateurs, eux-mêmes dépendants de stratégies de recherche particulières, ou inscrits dans des programmes politiques de gestion des risques. Comme nous l'avons écrit ailleurs⁴⁷, «On ne modélise plus seulement un système dont la complexité est celle des interactions Nature-Société, on modélise des enjeux, des éléments de décision ou d'expertise». De ce fait la principale caractéristique de ces modèles est qu'ils se veulent co-construits par les chercheurs et les usagers, qu'ils sont souvent développés en réseau et qu'ils doivent être aisément manipulables sous la forme de logiciels à interfaces graphiques. Le modèle n'existe pas sans le logiciel et il se confond avec lui. Comme ces modèles évoluent en permanence, les simulations exhibées sont difficilement attribuables à un système d'équations bien identifiées et difficilement reproductibles. Leur caractère scientifique est de ce fait souvent contesté, mais leur efficacité médiatique incontestable. Il n'est guère possible de considérer, comme dans une épistémologie classique, qu'il y a d'abord un substrat de connaissances scientifiques, puis sa traduction dans un modèle, et enfin des usages politiques et sociaux de ce modèle qui contribuerait à éclairer les décisions publiques ou privées. En

⁴⁷ Cf. [Armatte, 2005].

effet, la modélisation est d'entrée de jeu assise sur un questionnement politique qui formate le modèle (par exemple le choix de la seule variable température moyenne, la cible fournie par une négociation, ou bien encore le choix d'intervenir dans tel ou tel laps de temps) et sur des hypothèses générales d'évolution socio-économiques comme les fameux scénarios (une catégorie importante de la nouvelle épistémologie) bâtis par l'IPCC qui figent *a priori* l'ensemble des développements possibles des futures décennies sous la forme de quelques configurations typiques et caricaturales, intégrant à la fois des données présentes, des politiques, et des comportements des populations.

Si l'on prend comme autre exemple la modélisation des marchés financiers, la question de l'articulation de la modélisation avec la négociation et la décision apparaît bien plus immédiate qu'avec les modèles macroéconomiques ou climatiques□ c'est directement, au niveau de la décision des acteurs du marché que le modèle joue son rôle dans la négociation, puisque les traders utilisent directement ces outils en salle de marché. La régulation électronique des marchés financiers produit toutes sortes d'effets (vertueux ou pervers) que l'on ne peut observer directement qu'en finance, car le bouclage des phases de conception et d'usage sociaux des modèles y est très rapide. Les simulations du week-end conduisent à des modifications des modèles de gestion d'actifs directement opérationnelles le lundi. Les échelles de temps du marché financier⁴⁸ permettent de suivre en direct des comportements de processus aléatoires identifiés comme asymptotiques par la théorie, de vérifier les propriétés fractales d'indépendance des phénomènes par rapport aux échelles de temps, de voir des événements extrêmement rares s'y produire souvent, plus souvent d'ailleurs que ne le veut la théorie standard, et de mettre en place des approches prudentielles qui les prennent en compte.

En finance, comme dans les laboratoires qui travaillent sur les changements climatiques, comme encore dans les bureaux d'étude sollicités pour des études de trafic urbain et d'aménagement du territoire, les nouvelles formes et fonctions de la modélisation ont totalement reformaté les professions□ chartistes, mathématiciens, informaticiens ont des savoirs complémentaires ou concurrentiels plus ou moins valorisés dans les salles de marché. L'automatisation de la bourse a révélé tout un ensemble de savoirs et de règles qu'il fallait incorporer aux logiciels⁴⁹. Dans les laboratoires de climatologie, les chercheurs physiciens et mathématiciens se font informaticiens□ les modèles, sous leur forme logicielle, reconfigurent l'espace des métiers, construisent des marchés commerciaux ou communautaires spécifiques, en même temps qu'ils deviennent la seule langue commune de ces métiers.

Dès lors, le modèle, parce qu'il n'est jamais stabilisé et dépendant des commandes de simulation, devient un objet moins intéressant à étudier que les pratiques sociales de modélisation, ou de mobilisation de ces modèles dans des opérations de gestion ou de régulation de systèmes complexes. Car les modèles eux-mêmes sont instrumentalisés par les communautés de modélisateurs, par les décideurs qui mobilisent ces outils dans des cadres de négociation, de décision et de gestion partagée, où les enjeux dépassent ceux de la seule connaissance. La séparation entre «□arning about theories□ et «□arning about the world□ n'est plus possible□ce dernier aspect est en train de dévorer le premier. Dans ce nouveau contexte d'une science désunifiée mise en face d'objets très complexes, et surtout d'enjeux collectifs très importants, il nous semble que la vieille

⁴⁸ Le fax de Meriwether dans l'histoire du LTCM eut un effet dans les 5 minutes. (Cf. [D. MacKenzie in Armatte et Dahan, 2004]).

⁴⁹ Cf. les travaux de C. Walter et la thèse de F. Muniesa à l'École des Mines.

épistémologie des modèles comme instruments de médiation entre théorie et réalité observable ne colle plus à la réalité et se trompe d'objet. L'objet «le modèle» est l'objet de toutes les attentions, alors que ce qui lui donne sens, c'est l'activité de modélisation. À se focaliser uniquement sur les objets cognitifs, elle ne rend pas compte des acteurs qui mobilisent ces objets cognitifs dans des cadres politiques et stratégiques bien définis. Les philosophes des sciences qui s'en tiendraient au premier aspect seraient un peu comme un caméraman de télévision qui, dans un reportage d'un match de football, se contenterait uniquement de filmer le ballon en gros plan, sans jamais nous montrer ni les joueurs, ni les spectateurs, ni le stade. Bien sûr celui qui ferait l'inverse et uniquement l'inverse nous entraînerait aussi dans un monde totalement surréaliste dans lequel on ne comprendrait pas pourquoi les joueurs courent dans tous les sens.

Une épistémologie équilibrée de la modélisation qui historiciserait et sociologiserait «la notion de modèle» sans abandonner le point de vue cognitif est encore à construire. Mais on en connaît déjà quelques caractéristiques. L'attention portée trop longtemps sur sa nature et ses propriétés syntaxiques (rigueur, cohérence), qui s'est déjà déplacée historiquement sur ses propriétés sémantiques (pertinence, complétude), doit se déplacer encore vers les propriétés pragmatiques associées aux objectifs de la modélisation (efficacité heuristique, ou prévisionnelle, ou décisionnelle). Ces trois registres du modèle comme représentation signifiante mobilisée dans des usages de régulation des activités humaines, identifiés depuis les travaux de la linguistique structurale, repris par B. Walliser dans sa réflexion sur «Systèmes et modèles», doivent être traités à égalité, donc rééquilibrées. Si l'on veut simplement comprendre les enjeux scientifiques passés et présents de la modélisation dans le jeu entre sciences et société, il faut informer les logiques cognitives par les logiques sociales de la modélisation. Cette nouvelle épistémologie devrait donc s'attacher davantage à la modélisation qu'à la notion de modèle, aux jeux d'acteurs autour de cette activité, aux stratégies, à la professionnalisation, aux médiations qu'elle permet entre les groupes, à la fonction qu'elle joue dans la décision et la coordination politique.

Cette nouvelle épistémologie devrait aussi s'attacher aux variations historiques du rôle des modèles. La notion de modèle telle qu'elle est mobilisée dans les sciences n'est pas indépendante de l'histoire même de ces sciences. L'invariance de la notion de modèle à travers les âges de la science est peut être un désir de la philosophie spontanée du savant, mais pas une réalité de «la science en train de se faire» qui, on le sait depuis Kuhn, s'inscrit dans une succession de paradigmes qui sont à la fois des configurations d'idées, de méthodes, d'instruments, d'objectifs et de groupes sociaux. Que l'on ne reconnaisse pas totalement pertinente la notion de paradigme ne devrait pas empêcher de reconnaître au moins que la notion de modèle possède une historicité, et que celle-ci doit beaucoup pour le dernier siècle à quelques innovations fondamentales qui ont bouleversé ses formes, ses significations et ses usages. Pensons seulement à l'irruption des mathématiques appliquées, de la recherche opérationnelle, et de l'ordinateur dans l'immédiat après guerre.

En troisième lieu, cette nouvelle épistémologie des modèles devrait s'attacher à leur géographie. L'unicité de la notion de modèle dans l'espace, à travers les différentes provinces et spécialités de la Science, n'est pas davantage une réalité, mais le plus souvent un désir ou une fiction de la «Science unitaire» qui le dispute constamment à son éclatement en disciplines académiques ou domaines d'application, pour lesquels la notion de modèle aurait des déclinaisons spécifiques. En fait, il faut reconnaître à la fois l'illusion d'une science unitaire, et donc la spécificité des approches formelles de tel ou tel champ de la connaissance, mais aussi la circulation de ces formes entre les champs

de la connaissance par le biais d'échanges, d'analogies, d'emprunts et d'exportations, qu'ils relèvent d'une économie contrôlée ou d'une activité de contrebande. La spécificité des sciences sociales vis-à-vis des sciences physiques peut être pertinente à un moment mais s'efface à un autre, face à une coupure plus pertinente entre science expérimentale et science d'observation. Il y a plus de point commun à ce titre entre économie et astronomie qu'entre psychologie et sociologie. On remarquerait alors, que la séparation entre sciences physiques et sciences sociales perdrait en partie, mais en partie seulement, son sens.

Histoire, sociologie, géographie, on voit que la notion de modèle mathématique ne relève que très partiellement des mathématiques elles-mêmes. Reconnaître la capacité du modèle à voyager entre plusieurs domaines, voire sa puissance de simulation et de coordination de savoirs et de communautés hétérogènes dès lors qu'il est associé à l'informatique, oblige à reconnaître la dimension *interdisciplinaire* de la notion de modèle elle-même.

BIBLIOGRAPHIE

ANDLER D., « Logique mathématique » et « modèle mathématique », *Encyclopaedia Universalis*, 1981, p. 185-196.

APOSTEL L., "Towards the formal Study of Models in non-formal Sciences", Freudenthal: *The Concept and the role of Models in Mathematics and Natural and Social Sciences*, D.Reidel, Dordrecht, Holland, 1961.

ARMATTE M. *et al.* (Les Messages), « Mathématiques et sciences humaines : des années soixante aux années quatre-vingts », *La vie des sciences. Comptes-rendus de l'Académie des Sciences*, tome 6, 1989, n° 1, p.59-76 ; n° 2, p.139-165.

ARMATTE M., « Histoire du modèle linéaire. Formes et usages en Statistique et Econométrie », Thèse EHESS sous la direction de J. Mairesse, 1995.

ARMATTE M., « Les mathématiques sauraient-elles nous sortir de la crise économique ? X-Crise au fondement de la technocratie », Thierry Martin (ed.), *Mathématiques et action politique*, Paris, INED, 2000.

ARMATTE M., DESROSIÈRES A., « Méthodes mathématiques et statistiques en économie : nouvelles questions sur d'anciennes querelles », J.P. Beaud et J.G. Prévost (eds.), *L'ère du chiffre, systèmes statistiques et traditions nationales*, Presses Universitaires du Québec, Montréal, 2000, p. 431-481.

ARMATTE M., DAHAN-DALMEDICO A., « Modèles et modélisations (1950-2000) : nouvelles pratiques, nouveaux enjeux », *Revue d'Histoire des Sciences*, 57(2), 2004, p.245-305.

ARMATTE M., « Modèles et systèmes complexes : le changement climatique global, compte-rendu d'un workshop », *La Gazette des Mathématiciens*, Paris, janvier 2004(a), p. 35-40.

ARMATTE M., « Les sciences économiques reconfigurées par la pax americana », Pestre et Dahan (eds), *les sciences dans et pour la guerre, 1940-1960*, Paris, Presses de l'EHESS, 2004(b), p.129-174.

ARMATTE M., "Economic Models of Climate Change: The Costs and Advantages of Integration", Actes du colloque d'Arcidosso (2-5 sept 2003), *The science of complexity*, 2005 [à paraître].

ARTUS P., DELEAU M., MALGRANGE P., *Modélisation macroéconomique*, Paris, Economica, 1986.

- BACHELARD S., « Quelques aspects historiques des notions de modèle et de justification des modèles », Actes du colloque *Elaboration et justification des modèles*, ed. Delattre, Paris, Maloine, 1979.
- BADIOU A., *Le concept de modèle*, Paris, Maspero, 1969, 92 p.
- BARBEROUSSE A., LUDWIG P., « Les modèles comme fictions », *Philosophie* 68, 2000, p. 16-43.
- BLANCHÉ R., *l'axiomatique*, Paris, PUF, 1955. 2^e édition Quadrige, 1999.
- BODKIN R.G., KLEIN L.R., MARWAH K., *A History of Macroeconometric Model-Building*, Edward Elgar, 1991.
- BOLTZMANN L., "Models", *Encyclopaedia Britannica*, 1902.
- BOREL E., « Mécanique Statistique. Exposé d'après l'article allemand de P. Ehrenfest, T. Ehrenfest », *Encyclopédie des Sciences Mathématiques pures et appliquées*, IV-2, Jules Molk (ed.), Gauthier-Villars, 1915, Traduit de l'*Encyklopädie der mathematischen Wissenschaften*, B.G. Teubner (ed), IV:2:II, n° 6, Leipzig, 1912.
- BOUDON R., *A quoi sert la notion de structure*, Paris, Gallimard, 1968.
- BOULEAU N., *Philosophie des mathématiques et de la modélisation*, Paris, l'Harmattan, 1999.
- BOUMANS M., *A Case of limited Physics Transfer: Jan Tinbergen's resources for re-shaping Economics*, Academish Proefschrift, Univ. Amsterdam, Tinsbergen Institute Research Series, 1992, 155 p.
- BOURDIEU P., « Le Champ Scientifique », *Actes de la Recherche en Sciences Sociales*, n° 11, 1976, p 88-104.
- BOX G.E.P., JENKINS G.M., *Time Series Analysis: Forecasting and Control*, San Francisco, Holden Day, 1976.
- BRISSAUD M., FORÉ M., ZIGHED A. (eds), *Modélisation, confluent des sciences*, Paris, éditions du CNRS, 1990.
- CARNAP R., *Der logische Aufbau der Welt*, 1928. Traduction anglaise 1967.
- CARNAP R., 1934, *Logische Syntax der Sprache*, 1934. Traduction anglaise, *Logical Syntax of Language*, N. Y., 1937.
- CHAREMZA W., DEADMAN D.F., *New Directions in Econometric Practice*, Edward Elgar, 1997.
- CHRIST C.F., "History of the Cowles Commission 1932-52", *Econometrics, Macroeconomics and Economic Policy. Selected Papers of Carl. F. Christ*, Edward Elgar, 1996 (1ère ed. 1952).
- COWLES COMMISSION FOR RESEARCH IN ECONOMICS, Reports for 1939-1954, University of Chicago.
- COWLES COMMISSION FOR RESEARCH IN ECONOMICS, Reports for 1948-1949, University of Chicago.
- DAHAN A., « L'essor des mathématiques appliquées aux États-Unis : l'impact de la seconde guerre mondiale », *Revue d'histoire des mathématiques* 2, 1996, p. 149-213.
- DAHAN A., "History and Epistemology of Models: Meteorology as a case-study (1946-1963)", *Archive for History of Exact Sciences* 55, 2001, p. 395-422.
- DAHAN A., « Axiomatiser, modéliser, calculer : les mathématiques, instrument universel et polymorphe d'action », *Les Sciences dans et pour la Guerre*, A. Dahan et D. Pestre (eds), Presses de l'EHESS, 2004.
- DAHAN A., PESTRE D. (eds), *Les Sciences dans et pour la guerre, 1940-1960*, Paris, Presses de l'EHESS, 2004.
- DAIGNEAULT A., *Théorie des modèles en logique mathématique*, Presses de l'Université de Montréal, 1967.

- DE MARCHI N., GILBERT C. (eds), *History and methodology of Econometrics*, Oxford Economic Papers, 41, Janvier 1989.
- DELATTRE P., THELLIER M. (eds), Actes du colloque *Elaboration et justifications des modèles*, Paris, Maloine-Douin, 1979.
- DESROSIÈRES A., *La politique des grands nombres*, Paris, La Découverte, 2000.
- DEZALAY Y., GARTH B., « Le Washington Consensus », *Actes de la Recherche en Sciences Sociales*, 121-122, 1998, p. 3-22.
- DIVISIA F., *Economique rationnelle*, Paris, Doin, in-18, 1927, 443p.
- DORFMAN R., SAMUELSON P., SOLOW R., *Linear Programming and Economic Analysis*, New York, McGraw-Hill, 1959. Traduction française Dunod, Paris 1962.
- DUHEM P., *La théorie physique*, Paris, Chevalier et Rivière, 1906. 2^e édition 1914.
- DUPUY J.P., *Aux origines des sciences cognitives*, Paris, La Découverte, 1994.
- EDWARDS P., “The World in a machine: Origins and impacts of a early computerized global systems models”, in Hughes Agatha & Thomas (ed.), *Systems Experts and Computers*, University of Chicago Press, 2000
- ENGEL R.F., GRANGER C.W.J., “Co-Integration and Error Correction: Representation, Estimation and Testing”, *Econometrica*, 55-2, 1987, p. 251-276.
- EPAULARD A., *Les modèles appliqués de la macroéconomie*, Dunod, 1997.
- FORRESTER J., *World Dynamics*, Cambridge, MA, MIT Press, 1971.
- FOUCAULT M., *Les mots et les choses*, Paris, Gallimard, 1966.
- FRECHET M., « Enquête... sur les possibilités et les limites de l'application des sciences mathématiques et en particulier du calcul des probabilités, à l'étude des phénomènes économiques ou sociaux », *Revue de l'IIS*, 1946, p. 16-51.
- FREUDENTHAL H. (ed.), *The Concept and the role of Models in Mathematics and Natural and Social Sciences*, Dordrecht, D.Reidel, 1961.
- FRISCH R., “Propagation Problems and Impulse Problems in Dynamic Economics”, *Economic Assays in Honour of Gustav Cassel*, London, Allen & Unwin, 1933.
- GALLISON P., “Computer Simulations and the Trading Zone”, *The Disunity of Science: Boundaries, Contexts, and Power*, P. Galison and D.J. Stump (eds), 1996, p. 118-57.
- GIORELLO G., « Théories et modèles dans la science », *Querelle de modèles*, Cahiers S.T.S. 5, Paris, CNRS, 1984, p. 27-36.
- GIRAUD J. N. (dir.), *Effet de serre : modélisation économique et décision politique*, Rapport Commissariat Général du Plan, Paris, La documentation française, 2001.
- GUESNERIE R. (dir.), *Kyoto et l'économie de l'effet de serre*, rapport au Conseil d'analyse économique, Paris, La documentation française, 2003.
- GUILLAUME E, GUILLAUME G., *Sur les fondements de l'économique rationnelle*, Paris, Gauthier-Villars, 1932.
- GUILLAUME E, GUILLAUME G., *Économique rationnelle*, Paris, Hermann, 1937.
- GUILLAUME Marc, *Modèles économiques*, Paris, Presses Universitaires de France, 1971.
- HAAVELMO T., *The probability Approach in Econometrics*, Supplément à *Econometrica* 12, 1944, 115 p.
- HENDRY D. F., *Econometrics. Alchemy or Science? Essays in Econometric Methodology*, Blackwell, 1993.
- HOOVER K.D (ed.), *Macroeconometrics. Developments, Tensions and Prospects*, Kluwer Academic Publ., 1995.
- ISRAEL G., *La mathématisation du réel*, Paris, Le Seuil, 1996.
- JACOB P., *L'empirisme logique*, Paris, éd. de Minuit, 1980.

- KEYNES J. M., "Professor Tinbergen's Method", *Economic Journal* 49, 1939, p. 558-568. (Réponse de Tinbergen dans le n° 50, p.141-156)
- KEYNES J.M., « Lettre à Roy Harrod », *The Collected Writings of John Maynard Keynes*, vol. XIV, 296-7, D. Moggridge (ed.), London, Macmillan, 1938.
- KIEKEN H., DAHAN A. et ARMATTE M., « La modélisation, moment critique des recherches sur l'environnement », *Nature Sciences et Sociétés* 11(4), 2003, p. 396-403
- KLEIN L, *Economic fluctuations in the United States (1921-41)*, New York, John Wiley, Cowles Foundation Monograph n° 11, 1950.
- KOOPMANS T.C. (ed.), *Statistical inference in dynamic models*, University of Chicago, Cowles Foundation Monograph n° 10, 1950.
- KOOPMANS T.C. (ed.), *Activity Analysis of Production and Allocation*, Cowles Foundation Monograph n° 13, 1951.
- KOOPMANS T.C., "Measurement without Theory", *Review of Economics and Statistics* 29, 1947, p.161-172.
- LE MOIGNE J.L., *Théorie du système général. Théorie de la modélisation*, Paris, Presses Universitaires de France, 1977.
- LUCAS R.E., "Econometric policy evaluation: a critique", *The Phillips curve and Labor Markets*, Brunner et Mertzner eds, Amsterdam, North Holland, 1976.
- MACH E., *La Mécanique, exposé historique et critique de son développement*, traduction E. Bertrand, Introduction E. Picard, Paris, Hermann, 1904, (1^e édition 1880).
- MALGRANGE P., « Force et faiblesse des modèles macroéconométriques », *Modélisation et Décisions économiques*, B. Cornet et H. Tulkens eds., Louvain, Université De Boeck, 1990.
- MATARASSO P., « Quelques remarques sur l'intégration de modèles climatiques, biophysiques et économiques dans le cadre de recherches sur l'environnement », *Tendances nouvelles en Modélisation*, Paris, CNRS éditions, 2000, p. 197-205.
- MEADOWS D. L., MEADOWS D.H., *The limits of growth. A report for the Club of Rome's project on the predicament of mankind*, N.Y., American Library, 1974.
- MENGER K., "The formative years of Abraham Wald and his work in geometry", *Annals of math. stat.*, n° 23, 1952.
- MIROWSKI P., "The Measurement without theory controversy...", *Economies et Sociétés, Oeconomia*, n° 11, 1989, p. 65-87.
- MIROWSKI P., "The probabilistic counter-revolution, or how stochastic concepts came to neo-classical economic theory", *Oxford Economic Papers* 41, Janvier 1989, p. 217-235.
- MIROWSKI P., *More Heat than Light. Economics as Social Physics, Physics as Nature's Economics*, Cambridge University Press, 1989.
- MONGIN P., « La méthodologie économique au XX^e siècle. Les controverses en théorie de l'entreprise et la théorie des préférences révélées », A. Béraud et G. Faccarello (eds), *Nouvelle histoire de la pensée économique*, Paris, La Découverte, 2000.
- MONGIN P., « L'axiomatisation et les théories économiques », *Revue Économique*, vol. 55, n° 1, 2004.
- MORGAN M. S., *The History of Econometrics Ideas*, Cambridge Univ.Press, 1990.
- MORGAN M., MORRISON M., *Models as Mediators. Perspectives on natural and social science*, Cambridge, Cambridge University Press, 1999.
- MOULOUD N., « Modèle », *Encyclopaedia Universalis*, 1981, p. 387-416.
- NEUMANN J. (von), MORGENSTERN O., *Theory of Games and Economic Behavior*, New York, Wiley, 1947, 2^e édition révisée, 1947.

- NEURATH O., « La conception scientifique du monde », *Manifeste du Cercle de Vienne et autres écrits*, ed. A.Soulez, 1929, Paris, Presses Universitaires de France, 1985.
- NOUVEL P. (ed.), *Enquête sur le concept de modèle*, Paris, Presses Universitaires de France, 2002.
- PAROCHIA D., « Quelques aspects épistémologiques et historiques sur les notions de système et de modèle », Actes du colloque : *La modélisation : confluent des sciences*, Université de Lyon I et CNRS, 1989, p.142-159.
- SCHUBERT K., « Les modèles d'équilibre général calculable : une revue de la littérature », *Revue d'économie politique* 103(6), 1993, p. 775-825.
- SIMON H. A., *Models of Man*, New York, Wiley, 1957.
- SINACEUR H., « Modèle », Dominique Lecourt (ed.), *Dictionnaire d'histoire et de philosophie des sciences*, Paris, Presses Universitaires de France, 1999, p. 649-651.
- SIMS C.A., "Macroeconomics and Reality", *Econometrica*, n° 48,I, 1980, p. 1-48.
- SISMONDO S. (ed.), "Modeling and Simulation", *Science in context* 12-2, Cambridge University Press, 1999.
- SPANOS A., *Statistical foundations of econometric modelling*, Cambridge University Press, 1986.
- SUPPES P., "A comparaison of the Meaning and Uses of Models in Mathematics and the Empirical Science", Freudenthal, *The Concept and the Role of the Models in Mathematics and Natural and Social Sciences*, Reidel eds, Dordrecht, Holland, 1961.
- TARSKI A., « Le concept de vérité dans les langages formalisés », in *Logique, Sémantique, metamathématique*, 1935. Traduction française G.Granger, A.Colin, 2 vol.,1972/1974.
- TARSKI A., "Contributions to the Theory of Models", *Proc.Kon.Neder.Akad.* vol 57, 1954, p. 572-588 et vol 58, 1955, p.56-64.
- THOM R., « D'un modèle de la science à une science des modèles », *Synthèse*, vol 31, n° 2, 1975, p. 359-374.
- THOM R., « Modélisation et scientificité », Actes du colloque *Elaboration et Justification des Modèles*, ed.Delattre, Paris, Maloine, 1979.
- TINBERGEN J., *Minimumproblemen in de natuurkunde en de ekonomie*, Amsterdam, Paris, 1929, XV + 65 p.
- TINBERGEN J., *An Economic Approach to Business Cycle Problems*, Gibrat ed., Paris, Hermann, 1937.
- TINBERGEN J., *Les fondements mathématiques de la stabilisation du mouvement des affaires*, exposés publiés sous la direction de G. Lutfalla, Paris, Hermann, 1938, 114 p.
- TINBERGEN J., *Vérification statistique des théories des cycles économiques* ; Vol. I : « Une méthode et son application au mouvement des investissements », 178 p.; Vol. II : « Les cycles économiques aux Etas-Unis d'Amérique de 1919 à 1932 », Genève, Société des Nations, 1939, 267 p.
- ULLMO J., 1938, « Recherches sur l'équilibre économique », *Annales de l'Institut H. Poincaré*, t. VIII, fasc. I, Paris, Gauthier-Villars, 1938, p. 1-62, [revue par les frères Guillaume in X-Crise, 1938]
- ULLMO J., *La pensée scientifique moderne*, Paris, Flammarion, 1969.
- WALLISER B., *Systèmes et Modèles. Introduction critique à l'analyse des systèmes*, Paris, Le Seuil, 1977.
- WALLISER B., « La science économique », *Épistémologie des sciences sociales*, J.M. Berthelot (ed.), Paris, Presses Universitaires de France, 2001, p. 117-147.
- WALLISER B., *L'intelligence de l'Economie*, Paris, éditions Odile Jacob, 1994.

WALTER C., « Une histoire du concept d'efficacité sur les marchés financiers », *Annales HSS*, 1996-4, p. 873-905.

WEINTRAUB E. R., *How Economics became a Mathematical Science*, Durham and London, Duke University Press, 2002.

WINSBERG E., "Sanctioning Models: The Epistemology of Simulation", *Science in Context*, vol. 12, n° 2, 1999, p. 275-292.

ZYLBERBERG A., *L'Economie Mathématique en France*, Paris, Economica, 1990.