

**BULLETIN N° 145  
ACADÉMIE EUROPEENNE  
INTERDISCIPLINAIRE  
DES SCIENCES**



**Séance du mardi 11 mai 2010:**

**Axes de recherche de la modélisation et de l'axiomatisation des sciences sociales  
avec Robert FRANCK, Professeur émérite à l'Université Catholique de Louvain,  
philosophe des sciences,**

**Prochaine séance : mardi 8 juin 2010:**

**MSH, salle 215-18heures**

**Réception de Brigitte Debuire, Professeur de Médecine, Université Paris XI, en  
présence de Marie-Louise Labat, qui revient après une longue convalescence.**

**Discussion sur les disciplines étudiées dans le cadre de nos travaux en cours  
(modélisation-axiomatisation dans les sciences humaines).**

# ACADEMIE EUROPEENNE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES

## FONDATION DE LA MAISON DES SCIENCES DE L'HOMME

**PRESIDENT** : Michel GONDRAN  
**VICE PRESIDENT** : Pr Victor MASTRANGELO  
**SECRETARE GENERAL** : Irène HERPE-LITWIN  
**TRESORIER GENERAL** : Bruno BLONDEL  
**MEMBRE DU CA** Patrice CROSSA-RAYNAUD

**PRESIDENT FONDATEUR** : Dr. Lucien LEVY (†)  
**PRESIDENT D'HONNEUR** : Gilbert BELAUBRE  
**SECRETARE GENERAL D'HONNEUR** : Pr. P. LIACOPOULOS (†)

**CONSEILLERS SCIENTIFIQUES** :  
**SCIENCES DE LA MATIERE** : Pr. Gilles COHEN-TANNOUDJI  
**SCIENCES DE LA VIE ET BIOTECHNIQUES** : Pr François BEGON

**SECTION DE NICE** :  
**PRESIDENT** : Doyen René DARS

**SECTION DE NANCY** :  
**PRESIDENT** : Pr Pierre NABET

Mai 2010

**N°145**

## TABLE DES MATIERES

- P. 03 Compte-rendu de la séance du mardi 11 mai 2010
- P. 06 Compte- rendu de la séance du 15 avril 2010 de la section Nice-Côte d'Azur
- P.08 Annonces
- P.09 Documents

**Prochaine séance: mardi 8 juin 2010 18h MSH, salle 215-18heures :**  
**Réception de Brigitte Debuire, Professeur de Médecine, Université Paris XI, en présence de Marie-Louise Labat, qui revient après une longue convalescence.**  
**Discussion sur les disciplines étudiées dans le cadre de nos travaux en cours**  
**(modélisation-axiomatisation dans les sciences humaines).**

**ACADEMIE EUROPEENNE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES**  
Maison des Sciences de l'Homme, Paris.

**Séance du**  
**Mardi 11 mai 2010**

**Maison des Sciences de l'Homme, salle 215, à 18 h.**

La séance est ouverte à 18 h. 00 sous la Présidence de Michel GONDRAN et en la présence de nos collègues Gilbert BELAUBRE, Claude ELBAZ, Walter GONZALEZ, Irène HERPE-LITWIN, Jacques LEVY, Pierre MARCHAIS, Victor MASTRANGELO, Pierre PESQUIES.

Etaient excusés François BEGON, Bruno BLONDEL, Alain CARDON, Gilles COHEN-TANNOUDJI, Brigitte DEBUIRE, Françoise DUTHEIL, Jean -Pierre FRANCOISE, Françoise DUTHEIL, Marie-Louise LABAT, Saadi LAHLOU, Gérard LEVY, Alain STAHL.

L'Ordre du jour appelle : une réflexion sur les Axes de recherche de la modélisation et de l'axiomatisation des sciences sociales avec le Pr Robert FRANCK. Il dirige avec Daniel Courgeau (INED) la **Methodos Series** chez *Springer* dans laquelle on peut trouver des explications détaillées.

Après avoir passé initialement en 1964 une thèse de philosophie morale, il s'intéresse ensuite à la philosophie analytique et plus particulièrement à celle du langage. Il effectue une recherche sur la nature du discours dont les principaux résultats sont publiés dans *la Revue philosophique de Louvain*. Dès lors son enseignement et ses publications portent sur la théorie de la connaissance, l'épistémologie, la sociologie des sciences, la psychologie, la pédagogie. Il est nommé Professeur en 1975 à l'UCL.

Depuis environ 20 ans, ses travaux portent particulièrement sur les méthodes en sciences sociales. Il est co-responsable du Centre de philosophie des sciences de l'UCL (Institut Supérieur de Philosophie) de 1991 à 2001. Il crée avec Guillaume Wunsch, en 1995, le Centre de méthodologie des sciences sociales Methodos au sein de la Faculté des sciences économiques, sociales et politiques de l'UCL. Il dirige ce Centre de 1997 à 2001 (nombreux colloques et séminaires), et crée en 2000 la **Methodos Series**, collection en langue anglaise aux éditions Kluwer Academic Publishers (fusionnées avec Springer depuis 2004). Pour plus d'informations on peut consulter le site [www.springeronline.com](http://www.springeronline.com), social sciences, Methodos Series. En 2002 il associe Daniel COURGEAU (Institut National d'Etudes Démographiques, Paris) à la direction de la collection.

Auteur de plusieurs ouvrages, Robert FRANCK a notamment publié en 2002, *The Explanatory Power of Models, Bridging the Gap between Empirical and Theoretical Research in the Social Sciences*, Dordrecht/Boston/London: Kluwer Academic Publishers (Methodos Series vol.1), 320p dont nous vous proposons la lecture de l'introduction.

Il est également auteur de nombreux articles sur l'axiomatisation et la modélisation en sciences sociales.

Dans un premier temps il va essayer de préciser les rapports entre modélisation et axiomatisation :

Modéliser en sciences sociales comporte plusieurs difficultés : Il faut trouver une définition à la modélisation, en cerner la nature, les atouts et les faiblesses. Il faut ensuite porter remède à ces faiblesses. Des tentatives ont été faites pour rapprocher axiomatisation et modélisation, ce qui doit également être analysé.

Après nous avoir fourni quelques exemples de tentatives de modélisation (modèles statistiques, mathématiques, conceptuels, diagrammes, cartes...) dans des domaines tels que géographie humaine, démographie, économie, sociologie, politique comparée, tente de définir la modélisation. Celle-ci consisterait à établir des relations causales entre une multitude de variables en abandonnant au passage le principe d'une même cause impliquant le même effet. La recherche actuelle se focaliserait plutôt sur une recherche de blocs de données produisant un effet, ce qui pose aussitôt la pertinence du choix de groupements des données en sciences sociales.

Pour essayer de définir à partir de cela le modèle, il nous renvoie aux travaux de TARSKI sur *La théorie des modèles* (1935) :

« 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  $S$ . »<sup>1</sup>

Puis à ceux plus récents de Patrick SUPPES qui 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. »

L'avantage de la modélisation est d'aborder des domaines très complexes comme celui des sciences sociales.

Par ailleurs, la modélisation serait l'objet essentiel de la connaissance scientifique plutôt que la connaissance de la nature en elle-même en vue de déterminer des structures, des formes présentes dans la nature. Ainsi on peut dire qu'un modèle scientifique est une structure abstraite composée d'un ensemble d'objets et de relations et d'opérations entre ces objets. En effet, toute structure en devenir nécessite des opérations entre les objets.

Selon notre conférencier, il ne faut néanmoins pas omettre que toute structure n'est qu'une approximation du réel (subjectivité) et abandonner la relation entre perception et réalité...

En sciences sociales, éminemment complexes, la modélisation comporte des atouts : par leurs caractères heuristiques, les modèles contribuent à découvrir la réalité complexe de la vie sociale. On essaie de dégager des structures de travail à l'aide d'outils statistiques, mathématiques.

Néanmoins un grand malaise persiste : il existe peu de repères dans ce domaine ce qui rend ardue la détermination des structures. Il est très difficile de repérer les variables pertinentes et de déterminer les facteurs de causalité. La recherche reste explicative.

<sup>1</sup> *Math. & Sci. hum. ~ Mathematics and Social Sciences* (43<sup>e</sup> année, n° 172, 2005(4), p. 91-123)

Plutôt qu'à s'en tenir à une simple explication causale, à l'aide d'études statistiques, il convient de rechercher les fonctions du mécanisme étudié. On mettrait ainsi en évidence dans un système **une chaîne de fonctions** plutôt qu'une chaîne causale.

La modélisation consisterait alors à identifier les paramètres, les fonctions, les objets abstraits qui mis en relation engendrent un effet.

A partir de là on peut **induire** les propriétés du système étudié et notamment **les axiomes** de la théorie.

De nombreuses questions relatives à l'axiomatisation, le nombre de fonctions sont posées au conférencier.

Après cette riche discussion , la séance prend fin.

Bien amicalement à vous,

Irène HERPE-LITWIN

# Comptes-rendus de la section Nice-Côte d'Azur

« Et pour qui donc ai-je tant appris ? »  
 - N'aie point peur que ta peine ne soit  
 perdue : tu as appris pour toi.  
 Sénèque.

## Compte-rendu de la séance du 15 avril 2010 (136<sup>ème</sup> séance)

### Présents :

Richard Beaud, Patrice Crossa-Raynaud, François Cuzin, Guy Darcourt, René Dars, Jean-Pierre Delmont, Yves Ignazi, Jacques Lebraty, Maurice Papo.

### Excusés :

Jean Aubouin, Alain Bernard, René Blanchet, Sonia Chakhoff, Jean-Paul Goux.

### 1- Approbation du compte-rendu de la 135<sup>ème</sup> séance.

Le compte-rendu est approuvé à l'unanimité des présents.

### 2- Débats sur la diversité : « La diversité génétique par François Cuzin.

Comme souvent en nos temps de communication médiatique déchaînée, nous avons beaucoup entendu parler du génome, nous annonçant l'arrivée à la connaissance ultime des vivants et de l'humain en particulier. En fait, on sait très peu de ces phénomènes fondamentaux. Plus les progrès scientifiques et techniques s'accumulent et plus on réalise tout ce que l'on ne connaît pas. Notre confrère tente un retour en arrière pour comprendre comment les choses se sont développées dans les dernières décennies.

Cet exposé et la discussion qui en ont découlé seront publiés ultérieurement.

### 3- Relations avec la Mairie de Nice.

Nous avons été informés personnellement par le Maire de Nice, que le Conseil Municipal nous accordait une somme de 1 500 € pour l'année 2010 pour subventionner nos activités.

Le Président a évidemment remercié le Maire de Nice et a chargé notre confrère Guy Darcourt de prendre contact avec le responsable du site Internet du service culturel de la Mairie de Nice et d'étudier la façon dont nous pourrions y figurer et l'approvisionner en textes de nos débats et colloques.

\*o\*

<p style="text-align: center;"><b>Prochaine réunion</b> le jeudi 20 mai 2010 à 17 heures au siège : Palais Marie Christine - 20 rue de France</p>
---

## Annonces

Notre Collègue, Antoine FRATINI, nous fait part de la parution de son dernier ouvrage intitulé « *La religion du dieu économie* » auprès des Editions EDILIVRE. Qui peut être passionnant en cette période de crise et au-delà....

Voici la présentation du site <http://www.edilivre.com/doc/19450> :

*"La religion du dieu Economie"* vient de paraître aux éditions Edilivre. Cet essai de Antoine Fratini présente une étude originale sur notre système économique qui est comparé à une religion inconsciente avec ses divinités, ses cultes, sa liturgie, ses sens de culpabilités spécifiques... Par ailleurs, l'auteur y présente pour la première fois les résultats de ses recherches sur la psychologie et la culture animistes considérées comme une nouvelle source d'inspiration pour la psychologie des profondeurs. Pour commander l'ouvrage ou en lire les premières pages gratuitement: <http://www.edilivre.com/doc/19450>

Quelques courts extraits:

« L'économie est comme un train lancé, sans frein et (ce qui est encore plus grave) dépourvu de programmation pour s'arrêter. Ce train nous mène droit vers le précipice. L'unique stratégie qui lui reste est de prolonger indéfiniment sa course ».

« Ainsi, le pouvoir économique et les sensations qui y sont liées se payent par un manque de pouvoir intérieur et des satisfactions qui en dérivent. Plus l'homme poursuit cette forme de pouvoir, plus il s'aliène de sa vraie nature (...) et perd ces « pouvoirs » psychiques et moraux (...) que la majeure partie des peuples animistes (...) posaient au sommet de leur échelle des valeurs ».

« Le but (de la psychanalyse) ne saurait se réduire à la création de personnalités parfaitement rationnelles», froides, détachées, qui ne projettent jamais rien ou qui investissent toute leur énergie psychique sur le travail au nom d'Économie ».



## Documents

Pour illustrer l'intervention de Robert FRANCK nous vous proposons :

p. 10 : Une introduction (en anglais) à son ouvrage *The Explanatory Power of Models, Bridging the Gap between Empirical and Theoretical Research*, Boston/Dordrecht/London : Kluwer Academic Publisher, Methodos Series vol.1, 1-8

Pour illustrer la problématique de la modélisation nous vous un extrait d'un article paru dans :

p.17 : La notion de modèle dans les sciences sociales ; anciennes et nouvelles par Michel ARMATTE de l'Université Paris DAUPHINE

:

*The Explanatory Power of Models, Bridging the Gap between Empirical and Theoretical Research*, Boston/Dordrecht/London : Kluwer Academic Publisher, Methodos Series vol.1, 1-8

## GENERAL INTRODUCTION

Robert Franck

### 1. The ends and the means

For more than half a century there has been a deep malaise in the social sciences. The gap between empirical and theoretical research is accompanied by a divorce between the researchers: those undertaking empirical studies and those who seek theoretical syntheses scarcely communicate at all, and sometimes appear to inhabit very remote planets. On the empirical side, techniques of investigation have become ever more refined and sophisticated, and the results generated, from qualitative as well as quantitative methods, pile up year on year. But even more pressing becomes the question as to how these results contribute to a better understanding of social life. Do they provide us with better criteria of decision and action? Do they improve our explanations of social reality, and our grasp of the forces regulating social change? It is widely agreed that the empirical work would be better aimed were it based on firmer theoretical underpinnings. For example, before gathering data, several choices are necessary : the field of observations must be specified, as must the relevant objects within this field (agents, attitudes, values, organisations, social classes, institutions, and so on); those facts considered pertinent must be identified; variables and indicators must be chosen. Most often these choices are guided by common sense and received wisdom. It would be preferable were we able to give them a theoretical foundation. But how can this be achieved? How can theory be given its rightful place at the heart of empirical research?

The use of models is widespread nowadays throughout the different disciplines of social science. How should we go about modelling in such a way that empirical research profits most from theory? The collaboration of thirteen researchers from different fields allowed the examination of the following modelling practices: statistical models and mathematical models, conceptual models, diagrams and maps, machines, artificial neural networks and computer modelling. These practices have been approached through different disciplines: archaeology, demography, economy, engineering, geography, comparative politics, experimental psychology, sociology and philosophy of science. The authors of this book met for four days, to explore the questions on which they differed, and matters on which their analyses had concurred. The editor worked their conclusions into a larger framework, which is that of the book as a whole. There are four Parts, each including several chapters. The concluding sections of each Part put forward solutions to general problems which are analyzed in the chapters. The book progressively works out a method of constructing models which can bridge the gap between empirical and theoretical research and improve the explanatory power of models. This method has been reviewed by the book's contributors, but remains the editor's responsibility. It is summarized in the general conclusion.

## 2. Synopses of this book

### PART I: STATISTICAL MODELLING AND THE NEED FOR THEORY

Can theory improve statistical models? And, conversely, can statistical analysis provide any help in the construction of a good explanatory theory? Part I tries to answer to these questions. In order to explain statistical correlations, one can propose some hypothetical social mechanism which could generate them (chapter 1). When such a mechanism is advanced in general terms, we often say that we are dealing with a theory. Theory so understood can then inspire the design of statistical modelling processes. Still a theory of this kind can be interpreted in different ways, or encounter competing theories. Thus it does not enable us to create a consensus among researchers concerning the design which should be adopted. In consequence, it is not easy to build up cumulative knowledge. How could theory induce researchers to work with the same variables, and to model the variables in the same way?

The social mechanism retained by hypothesis may itself be expressed statistically, by means of causal modelling, in order to test its validity. Explanatory theory (i.e., a social mechanism) and statistical modelling are thus closely associated (chapters 3 and 4).

Still, even after the explanatory theory has been tested, difficulties remain. The choice of conceptual variables which belong to the theory, and their indicators, might have been different, and the nature of the relations between variables chosen remains obscure. Is there a solution to these difficulties?

Here is the solution put forward in the concluding section of Part I. A mechanism covers a number of functions. In order to represent a social mechanism, constructing a causal model of this mechanism is not enough; we must also model the combination of functions of the mechanism. The combination of functions within a social mechanism may be represented by a diagram; and simulation models are used just as often today (though more rarely in social science) for modelling functions. The functional architecture of a social mechanism, once modelled, may guide the design of the causal model of this mechanism. It confidently guides the choice of variables and indicators, and teaches us regarding the nature of the relations between these variables. It improves the explanatory power of causal modelling.

That which is theoretical in a social mechanism is its functional architecture, not its causal architecture. When attributing theoretical value to the combination of causes and effects which is operative in a given social mechanism, one encounters an insoluble difficulty: one would like to be able to attribute to a particular combination of causes and effects the general (if not universal) applicability which we expect from a theory. But everyone realizes this is impossible. A combination of functions, on the other hand, can be generalized. The possible contribution of theory to statistical modelling appears to lie in the modelling of the functions of a social mechanism.

### PART II: COMPUTER SIMULATION AND THE REVERSE ENGINEERING METHOD

Questions about how to construct a functional model are taken up in Part II of this book. The discussion of the role of statistical analysis in psychology (chapter 2), draws attention to the fruitful distinction between the properties of a psychological or social system and the mechanism which generates those properties. Through the study of the properties of a system we can, in fact, discover the functions of that property-generating mechanism. In cognitive psychology it is thought normal to identify by induction, and starting from observed behaviors (i.e. the properties of the system), the architecture of cognitive functions. Such a procedure in social science is relatively rare. It is rare to see someone model the functional architecture of a social system, starting from a close analysis of its properties. That possibility is explored in Part II.

We look closely at the method of *reverse engineering*. This method employed by engineers consists in reproducing the functional structure of a machine, starting from the study of its properties. The same

procedure inspires simulation models, and it is the source of their usefulness. Potential uses of computer simulations based on the reverse engineering method are examined in macro-economics (chapter 5). Next, we concentrate on the explanatory power of artificial neural networks (chapter 6). These networks do not represent the material architecture of a mechanism, but they are still explanatory, because they can represent its functional architecture.

Functional models are transferable to various material systems. This offers new theoretical perspectives with regard to the possibility of generalizing research findings in social science (concluding section). In practical terms, reproducing by other means and in other contexts the success of a road safety campaign, or efficiency in the medical service, for example, is no longer a matter of luck when those in charge design their programs according to a functional model which will generate the desired results.

### PART III: MODELS AND THEORY

Part III widens our focus. The fecundity of a large number of different models for the description and explanation of social phenomena is the subject of an extended discussion in economic geography (chapter 7), demography of migratory phenomena (chapter 8), comparative politics (chapter 9), and the sociology of sports and games (chapter 10).

This discussion allows us to penetrate more deeply into the nature of social theories, and to differentiate theoretical models from empirical models (concluding section). In contrast with empirical models which represent the network of relations - quantitative or qualitative - which exists between observable variables, theoretical models represent a structure which is formal, necessary, generalizable, and which has the status of a principle. The explanations to which theoretical models give rise are also different from the causal like explanations provided by empirical models. We will ask ourselves whether the combination of these two kinds of explanation can help to bridge the gap between empirical and theoretical research.

### PART IV: EPISTEMOLOGICAL LANDMARKS

The last Part of the book focuses our attention on the need to leave behind certain elements of current epistemological thinking. The covering law approach hinders social research and leads to a pessimistic view of the explanatory capacities of the social sciences. To hold law-like generalizations necessary for true scientific explanation is to sacrifice any possibility of the social sciences deserving such scientific status. To hold instead that in social sciences just as in natural sciences, facts can be explained in two complementary ways, with reference to the mechanism which generates them, and with reference to the formal system which commands the mechanism, opens new avenues of research, as much empirical as theoretical. For example, this point of view offers the possibility of validating the models obtained with computer simulations and of assessing their explanatory power (chapter 11). The semantic approach in philosophy of science goes some way towards offering a satisfactory epistemological basis for differentiating theoretical (formal) explanatory models from empirical (causal) explanatory models.

The deductive concept of explanation is another important idea in the covering law approach. Is this less onerous for the social sciences than the demand to produce law-like generalizations? The deductive concept of explanation was rejected by the pioneers of modern science (Bacon, Galileo, Descartes, Newton, etc.) in favor of an inductive concept of explanation (concluding section). These authors had a different idea of induction than the one which is familiar to us (generalization from particular facts). Induction consisted in discovering a system's principles from a study of its properties, by way of experiment and observation. This procedure - the procedure of classical induction - is given in Parts I and III the task of constructing theoretical models, including functional models. This is also the procedure illustrated in Part II by the reverse engineering method. The deductive concept of explanation has replaced classical induction in philosophy of science, and this deprives the social sciences from the advantages which the natural sciences enjoy, since they never stopped using the

method of classical induction. We might add that the empiricism and realism which accompany the concept of classical induction are quite different from the empiricism and pseudo-realism (phenomenalism) of the covering law approach.

The programme of 'practical epistemology' (chapter 12), which is proposed for the analysis of the content of an argument in archaeology and also more generally in social science, demonstrates that in addition to deductive implications, there are inductive implications. These consist in the discovery of that which is implied by certain facts or things. It is that which is implied by facts or things that explains those same facts or things. This explanatory procedure is common in the sciences, and we can liken it to the procedure of classical induction when it rises to the level of generality of principles.

### 3. *Some characteristics of scientific models*

Before we begin to read the chapters of this book, let us draw attention to some general characteristics of scientific models, in an attempt to leave behind the confusion that often accompanies the term 'model'.

Scholars have turned to models since the birth of modern science. It seems that modelling is indispensable for science. Nature is highly complex and changeable, as is the social world, and neither the natural nor the social world can be conceived except via simplifying schemas. *Models provide a simplified representation of the phenomenon* (1). This is the first characteristic of scientific models of which we take notice.

It would be impossible to test a representation seeking to copy all aspects of a phenomenon. Only a simplifying schema is susceptible to testing in experiments. *Scientific models are testable* (2).

Here is a third characteristic. *It is the model itself that, in the scientific approach, becomes the object of study* (3), rather than the real phenomenon (which is too complex). This characteristic of scientific models has been a theme of the semantic approach to philosophy of science (see F. Suppe 1989).

We generally think of a scientific model as a representation. But a model is more than a representation. According to one of the ordinary uses of the word, a model is that to which something should conform: for example, it can be a figure seated before an artist or a prototype. The notion of representation is absent from this current use of the word 'model'. The model is that which inspires the artist, it is not his painting; the model is the prototype, and not the product that conforms to it. In short, the model is that to which the representation must be faithful, and not the representation itself. By extension, when we describe a scientific representation as a model, we may suggest that such a representation, rather than copying the object represented, represents some object's essential characteristics. A formal structure, for example, may be termed a model in this sense. Hold this thought: *scientific models may represent that which is essential to the object*. (4). This is a fourth characteristic of scientific models. But what is essential? That we will discover shortly.

Let us illustrate these first four characteristics via the familiar example of Galileo's (1968) work on acceleration.

"If I notice that a stone, which is initially at rest but then falls from a height, accelerates as it falls, why should I not believe that this acceleration occurs in the way which is simplest to understand? And there is no multiplication, no increase, simpler to understand than one that occurs at a constant rate. (...) So, if we take any number of equal periods of time following the instant when the body began its fall from the position of rest, the speed attained during the first and second periods taken together will be double that attained during the first period. The speed attained in three time periods will be triple, and in four

periods the quadruple of that which the body had attained by the end of the first time period. (...) It therefore seems that we can suppose speed to be a function of time, without contradicting the truth."

As this extract shows, Galileo presents *a simplified representation* (1) of the acceleration of a falling body: "why should I not believe that this acceleration occurs in the way which is simplest to understand?" His model is *testable by experience* (2). And it is the model itself that becomes *the object of study* (3).

Galileo's model also illustrates the fourth characteristic that we have attributed to some scientific models: *they may represent that which is essential to the object* (4). Many commentaries have been devoted to the precarious means by which Galileo established experimentally the veracity of his model; he had no chronometer, for one thing! But this misses the point. What was important to Galileo was to establish his conclusion : "It therefore seems that we can suppose speed to be a function of time, without contradicting the truth". In his experimental set up, the speed attained during the first and second periods taken together were surely not exactly double that attained during the first period, and so on. But the results sufficed as a demonstration that the acceleration was generated at a constant rate. Galileo was thus able to make the point that the constancy of the acceleration permits the conclusion that speed is indeed a function of time.

This interpretation of Galileo's procedure was put forward by Alexandre Koyré (1966, p.88). Galileo is not content simply to represent a simplified version of the behaviour of a falling body in the absence of significant friction and external pressures. He also tries to get his model to represent the essence of acceleration. That is to say : *that without which* it would be impossible, for example, that the speed attained by a body in three time periods be approximately three times that speed attained in the first period, in the absence of significant friction and external forces. This would only be possible were acceleration a function of time. The essence of a process is that without which it could not take place as it does; it is that through which a process 'is what it is.'

You may notice a fifth and sixth characteristic of scientific models, illustrated by Galileo's model: *it is conceptual* (5) (acceleration is a function of time), yet *it allows the possibility of measurement and calculation* (6) (the speed attained...).

Here is another outstanding characteristic of some scientific models that is illustrated by Galileo's model: the representation of the phenomenon of acceleration offered by this model *allows explanation of the phenomenon*.(7). Why is acceleration produced as described in the model? *Because* acceleration is a function of time. Such an explanation is not a causal one; that is to say, it does not inform us about the factors producing the acceleration. Acceleration is explained by the essence of acceleration or, in another terminology, by the law which governs it. Here I refer to the classic sense of the word 'law', which will be commented on later on, in the conclusions of Part III and of Part IV. The metaphor of a law indicates the constraint inherent in the Galilean model of acceleration. What constraint? The speed attained by a falling body in three time periods is neither invariably nor necessarily triple that attained by the end of the first period, since a falling body can be subject to frictions and pressures. A falling body is never constrained to accelerate in the same manner. The constraint lies not in empirical regularities. The constraint that gives the model its necessity and universality, is that acceleration is a function of time. The constraint lies in the essence of acceleration.

Clearly, the interpretation of the work of Galileo proposed here owes nothing to the philosophy of science derived from David Hume, nor to the 'standard' approach brilliantly illustrated in the work of Hempel. We will discuss this later, in the fourth Part of the book.

Thus far we have discerned seven characteristics of scientific models. Let's pause a moment. Are all the models found in the scientific literature comparable with Galileo's model of acceleration? Far from it. Some are, but there are many others which are not conceptual models, or which are not amenable to

measurement and calculation nor to testing, or which fail to represent the 'essence' of the phenomenon studied (i.e., the 'law' to which it submits) or which fail to be explanatory. We could add that not all models are destined to serve as the object of study; a model can serve simply as an illustration, a point of comparison or a heuristic support.

Having enumerated those characteristics combined in Galileo's model but absent from many of the models employed in the social sciences that are our focus here, we are left with an awkward question. Should we conclude that all of these characteristics in the Galilean model are required for a 'good' scientific model, and admit that we are far from achieving this in the social sciences? Or can we conversely allow that existing models in the social sciences are all adequate insofar as they have at least some utility? Some would maintain that it is impossible in the social sciences to achieve all that is possible in the natural sciences, because social life is more complex than nature. But this common argument is wholly unpersuasive when we realise that it is in science never a question of studying, simultaneously and in all their complexity, all aspects of nature or society. Rather, science involves the research on simplified representations of nature and society. The difficulty lies not in the complexity of social reality, but in the weakness of the representations proposed. Here is the key question: what is missing from those simplifying representations, designed in the social sciences, which could make them as effective as many models in the natural sciences? Models in the social sciences could give more attention to the 'essence' - as defined above - of the object in study. The methodological suggestions which will appear as the four Parts of the book progress (and which are summarized in the general conclusions) show how this can be accomplished.

Now let us turn our attention to three other characteristics of scientific models.

Eighth characteristic: *a model is a fictive representation of reality* (8). Since models are simplified schemas of the phenomenon studied, they are inevitably incomplete. And when they seek to represent underlying mechanisms capable of generating the manifestations of a phenomenon, they are often exploratory, and sometimes deliberately imaginary. Does this mean that no criteria exist for guiding model building? Mario Bunge declares: "There are as many idealisations as idealisers, data and goals. Even if two model builders have access to the same empirical information, they may construct different models, for model building is a creative activity engaging the background, abilities and tastes of the builder" (1973, p.96). That train of thought can count many, if not most, social science researchers among its passengers. Model building might be left to the creative flair of the researcher. Models might only be judged at a later stage, by evaluating their theoretical or experimental fruitfulness. I don't share that point of view. We need to discover the criteria which should guide the construction of a 'good' model and which should help to bridge the gap between empirical and theoretical research. These criteria, we will see, may be compatible with the uncertain, exploratory, creative or even imaginary character that a 'good' model can have.

Ninth characteristic: *Scientific models represent systems*. (9) There have been many important developments, as much methodological and theoretical, in the understanding of the idea of a system. For the moment it should suffice to recall that which is generally implied by the idea: a set formed from subsets and relations between these subsets, and linked to an environment of which it in turn constitutes a subset. These relations, subsets and sets are real: whatever the status of reality accorded to the system, be it material or conceptual, it is this reality whose representation is the task of the model. Since models represent systems, they involve just two types of component: representations of relations, and representations of sets or subsets. These components may differ widely in nature according to the type of model, be it a map, a statistical model, a machine etc.

Whichever type of model it may be, *a model is isomorphic to the system that it represents* (10). In other words, there is a correspondence between the specifications of the model and those of the system. Examples of these specifications are: the network of subsets, or the mode of functioning of a

system. The isomorphism is never perfect, since the model will emphasize certain specifications of the system while neglecting others. This is the tenth characteristic of scientific models<sup>2</sup>.

---

#### REFERENCES

- BUNGE M. (1973), *Method, Model, and Matter*, Dordrecht, Reidel  
GALILEI G. (1968) *Discorsi, Le opere di Galileo Galilei*, vol.VIII, Firenze, G.Barbera Editore  
KOYRE A. (1966), *Etudes galiléennes*, Paris, Hermann  
SUPPE F. (1989), *The Semantic Conception of Theories and Scientific Realism*, Urbana, University of Illinois Press  
WALLISER B. (1977), *Systèmes et modèles, Introduction critique à l'analyse des systèmes*, Paris, Seuil

---

<sup>2</sup> For a deeper insight into the links between models and systems, see B.Walliser 1977



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

Michel ARMATTE<sup>3</sup>

**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<sup>e</sup> 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

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<sup>e</sup> siècle la modélisation mathématique en sciences sociales, et plus particulièrement en économétrie, puis de résumer en quelques propositions simples les résultats de travaux qui ont été menés sur ce sujet dans les dernières décennies. 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 climatique. 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 modeleurs, 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 principalement. Même si 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: «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.

<sup>3</sup> Université Paris-Dauphine (Place de Lattre de Tassigny, 75775 PARIS cedex 16) et Centre Alexandre Koyré,  
[michel.armatte@dauphine.fr](mailto:michel.armatte@dauphine.fr)

Illustrons cela par la célèbre figure de l'homme moyen que Quetelet, au milieu du XIX<sup>ème</sup> 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<sup>ème</sup> 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: 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<sup>ème</sup> siècle, dans lequel la spécificité intrinsèque des différents objets de science perd du terrain au profit des homologues de forme et de relations. Un troisième ingrédient qui caractérise plus particulièrement la notion de modèle dans les sciences sociales au XX<sup>ème</sup> 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<sup>ème</sup> 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<sup>ème</sup> 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 Britanica*, 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*. 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. 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 séparément.*

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 découvertes.*

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.*

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) qui témoigne d'un usage récurrent et important de la notion de modèle 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. Molik 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.

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 totalité».

Sous la pression de nombreuses critiques, en particulier des réalistes attachés aux significations des objets formels, mais aussi des intuitionnistes, l'approche formaliste adû 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.

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), «il 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 «cahier jaune» publié par Hahn, Neurath et Carnap en 1929 affirme:

*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 «amalgames métaphysiques». Il faut «purifier les concepts» 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 «d'énoncés protocolaires» en «correspondance» 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 Tarski, Carnap reconnaît l'impasse de cette première approche:

*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*

Il se convertit à une théorie logique nouvelle dans laquelle la sémantique formelle va relayer la preuve syntaxique défaillante, 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: 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 constituant un modèle euclidien de la géométrie Riemannienne. 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  $F' \tilde{A} L$  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: 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*: 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 «le système Taylor des mathématiques».

## **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 histoire 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 économiques, organe du mouvement X-Crise qui débattait ardemment des questions de réforme et de méthodologie économique dans les années 1930.

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 1935, 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 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 Divisia. 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*, 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 construisent 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 bâtit 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<sup>20</sup> qui devrait être maximisée pour réaliser un certain état que l'on s'accordera à trouver souhaitable.*

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 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 majeur, 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'épistémologie 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 ouvrages, 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 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 Badiou publié à la fin des années soixante. Alain Badiou, 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'unepoudre 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» proposent d'affaiblir la théorie de Tarski, pour faire sortir le concept de modèle du domaine intramathématique 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». 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 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, Göttingen, 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 volumes. 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.