

REVUE DE STATISTIQUE APPLIQUÉE

M. G. KENDALL

La construction des modèles et les problèmes qui s'y rattachent

Revue de statistique appliquée, tome 17, n° 2 (1969), p. 5-19

http://www.numdam.org/item?id=RSA_1969__17_2_5_0

© Société française de statistique, 1969, tous droits réservés.

L'accès aux archives de la revue « *Revue de statistique appliquée* » (<http://www.sfds.asso.fr/publicat/rsa.htm>) implique l'accord avec les conditions générales d'utilisation (<http://www.numdam.org/conditions>). Toute utilisation commerciale ou impression systématique est constitutive d'une infraction pénale. Toute copie ou impression de ce fichier doit contenir la présente mention de copyright.

NUMDAM

Article numérisé dans le cadre du programme
Numérisation de documents anciens mathématiques
<http://www.numdam.org/>

LA CONSTRUCTION DES MODÈLES ET LES PROBLÈMES QUI S'Y RATTACHENT⁽¹⁾

M. G. KENDALL

DEFINITION D'UN MODELE

1 - Au cours de ces dernières années, on a usé ou même abusé du terme "modèle" pour désigner presque toutes les tentatives faites en vue de préciser un système qu'on étudiait. Il y a des divergences de vues sur la nature des spécifications qui permettent la construction d'un modèle, dans l'acceptation scientifique du mot. Je ne voudrais pas entrer dans une discussion trop poussée sur le thème des définitions ; trop discuter des points fondamentaux est souvent un signe d'incertitude ou de manque de sécurité. Toutefois, il nous faudrait peut-être commencer cette conférence par une sorte d'aperçu sur la nature de notre sujet.

2 - Un "modèle" ne signifie pas nécessairement, ni même habituellement, une réplique physique d'un système, au sens dans lequel un constructeur d'avions fabrique un modèle pour étudier son comportement dans un tunnel aérodynamique ou un astronome établit un planétaire. Parfois, nos modèles sont effectivement des machines physiques ; il y a même des cas (comme par exemple celui du premier modèle hydro-dynamique du professeur Phillips représentant un système économique) où une série de relations non physiques sont imitées par un système physique. Dans la majorité des cas, toutefois, nous entendons par "modèle" une définition des relations d'interdépendance entre les différentes parties d'un système, en termes verbaux ou mathématiques, suffisamment claire et explicite pour nous permettre d'étudier le comportement du système dans une grande variété de circonstances et, plus particulièrement, pour nous permettre de le contester et de prédire son avenir.

3 - Un simple coup d'oeil aux revues habituelles nous montrera la gamme très étendue de sujets qui se basent maintenant sur la construction et l'analyse de modèles. Plus ou moins au hasard, je prends les exemples suivants dans la littérature publiée au cours de ces dernières années :

a) Une étude de Parks (1964) sur la naissance des incendies de forêts en Californie et la manière de les maîtriser.

(1) Nous remercions le Professeur M.G. Kendall d'avoir bien voulu nous autoriser à publier la traduction de cette conférence présentée à "Proceedings of the CEIR (Conference on Mathematical Model Building in Economics and Industry), et qu'il avait accepté de faire lors des réunions que le Centre de Formation avait organisées en Mai 1968 (réunions supprimées en raison des événements). (N. D. L. R.).

b) Une étude de Kilbridge & Webster (1966) sur la meilleure division du travail dans une chaîne d'assemblage continue dans une usine.

c) Une étude de Dill, Gaver & Weber (1965) sur l'avancement des employés en passant par les différents degrés de promotion, dans une hiérarchie.

d) Un groupe d'études (Cootner, éd. 1964) sur le comportement de la Bourse et quelques études analogues par Markovitz (1959) et Fama (1965) sur l'analyse d'un portefeuille de valeurs mobilières.

e) Une étude de Fox (1965) sur la formation des nuages.

f) Différents articles, comme celui de Gani & Yeo (1965) sur la reproduction en phase. Certains processus de mutation en génétique.

g) L'étude de Horvath (1966) sur la formation des groupes sociaux.

h) Les études de Charnes & collaborateurs (1965) et de Keller (1965) sur la commercialisation de produits nouveaux.

On pourrait allonger cette liste presque jusqu'à l'infini, car on trouverait difficilement une branche de la science ou de l'industrie qui échappe à l'oeil du constructeur de modèles.

4 - Or, il n'est nullement évident que toutes ces différentes applications se basent sur un ensemble de théories communes ou sur un groupe de techniques communes. Nous ne savons pas encore s'il est possible d'écrire un livre sur "La théorie de la construction des modèles". Toutefois, de même qu'il existe une série de problèmes de base, il existe aussi la nécessité d'avoir une technique de base, partagée par tous ceux qui pratiquent la construction de modèles. Dans le cadre de cet exposé, nous n'avons pas besoin de passer en revue le champ entier - en fait, nous ne le pourrions pas. Notre intérêt se limitera aux modèles au sens économique large, que l'on rencontre dans les systèmes industriels, commerciaux et économiques, et je pense que nous constaterons que, quel que soit le pays et quel que soit le but auquel est destiné le modèle, les problèmes et les techniques nécessaires pour les résoudre forment effectivement un sujet unifié. Tout au moins, c'est là un des résultats que nous espérons découvrir.

LES MODELES ET LES DECISIONS

5 - Il existe un point préliminaire qui demande à être clarifié. Le terme "modèle" pourrait laisser sous entendre que nous essayons de construire un microcosme du système en question, en ce sens que le modèle imitera le comportement de sa contrepartie macroscopique, sous tous les rapports. Or tel n'est pas le cas. Les systèmes que nous aurons à étudier sont bien trop compliqués pour permettre quelque chose de ce genre et nous découvrirons - tout au moins je le pense - qu'il nous faut continuellement réfréner l'ambition que nous pourrions avoir de construire des modèles ayant une valeur générale trop grande. Ou encore, pour nous exprimer en d'autres termes, nous construisons des modèles pour répondre à des buts spécifiques, et non pour satisfaire à tous les buts possibles. Quand nous nous engageons dans la construction d'un modèle, la première question qu'il faut se poser est

donc celle-ci : qu'en ferai-je, quand je l'aurai disponible ? Pour nous exprimer encore en d'autres termes, la façon dont nous construisons un modèle dépend de la décision qu'il doit, en dernière analyse, nous aider à prendre. Une des conséquences de ce que nous venons de dire est que nous pouvons avoir des modèles totalement différents du même système, répondant à des buts différents. Le modèle d'une société anonyme, établi dans le but de dresser les plans de placement de son capital, peut être très différent du modèle de la même société, établi dans le but de dresser le plan de circulation des informations, et tous deux seront différents d'un modèle des exigences en fait de main d'oeuvre.

6 - Personnellement, je suis même tenté d'aller plus loin, et de proposer que la construction de modèles commence par des modèles simples et modestes - ce que je dis ici s'entend d'une façon tout à fait générale - et que ce travail de construction tende vers des systèmes de plus en plus compliqués, par intégration, plutôt que de commencer en essayant d'établir des modèles généraux. Il y a là certains dangers ; mais les dangers existent partout quand on traite de ce sujet. Une simplification excessive peut ne pas imiter le système d'une manière suffisamment adéquate. Le profane est parfaitement en droit de se méfier d'un modèle brut, qui ne tient pas compte de certains aspects du système, dont il connaît l'existence et qu'il croit être importants. Mais je crois que la solution de cette difficulté particulière réside en grande partie dans la pleine réalisation du point que je viens de soulever : à savoir que le but d'un modèle ne consiste pas dans l'imitation, pour le seul but de l'imitation, mais que le modèle est fait pour permettre de prendre certaines décisions. La question qui se pose est donc de savoir si ce que nous omettons dans un modèle simplifié est important pour la décision à prendre, et non pour l'exactitude de la représentation.

7 - Il existe, évidemment, des modèles qui sont uniquement destinés à expliquer l'anatomie d'un système. Dans cet esprit, une carte géographique est un modèle de la zone à laquelle elle se rapporte, un diagramme de flux est un modèle d'un processus logique et systématique, et l'organigramme d'une société anonyme est, dans cette acception limitée, un modèle de la société anonyme, nonobstant le fait qu'il est toujours dépassé et que les écarts aux dispositions du tableau sont plus fréquentes que l'observation stricte de ses dispositions. Je propose que nous admettions ces images structurelles statiques d'une situation comme étant des modèles au sens où nous l'entendons ; - l'expression de modèles "iconiques" (imagés) a été proposée pour les désigner. Très souvent, ils constituent un préliminaire essentiel pour la construction d'un modèle de travail. Mais, quand il s'agit de contrôle et de prévisions, ce qui nous intéresse est bien plus qu'une représentation statique, quelle que puisse être son utilité. D'une façon ou d'une autre, c'est le mouvement du système qu'il nous faut considérer, et c'est ainsi que nos modèles sont presque toujours dynamiques.

LA CLASSIFICATION DES MODELES

8 - Il pourrait être utile d'avoir un système de classification des différents types de modèles que nous avons à étudier. Peut-être est-il trop tôt pour essayer d'établir un système de ce genre, au stade présent ; mais cela

permettra de clarifier les idées, si je mentionne quelques divisions possibles, même si elles impliquent une classification croisée.

a) Modèles déterministes, opposés aux modèles "stochastiques"

Dans certains cas, nous écrivons des équations qui expriment le comportement du système en termes purement déterministes. Cela est courant en physique, mais pas tellement courant dans les sciences sociales. Ainsi, par exemple, le modèle de Park pour un incendie de forêt est purement déterministe. Il en est de même du modèle de Kilbridge & Webster pour la chaîne d'assemblage progressive. Mais plus souvent, surtout en matière économique, il nous faut admettre l'existence d'éléments stochastiques ; cela revient à dire que quelques-unes de nos variables sont aléatoires, en ce sens que les valeurs effectives émergent du chaos de la prédestination, comme la chute des dés ou la rotation d'une roue de roulette. Les cas extrêmes de modèles purement "stochastiques" sont rares (la représentation des mouvements à la Bourse des valeurs par un modèle de "marche au hasard" constitue un cas à part) et presque tous les modèles dont nous aurons à nous occuper sont des modèles mixtes, à la fois déterministes et stochastiques. Parfois nous trouvons un comportement stochastique dans un système déterministe, comme par exemple les schémas de trafic au hasard dans un réseau fixe ; parfois le système lui-même est partiellement stochastique

b) "Résolution" opposée à "simulation"

Pour les systèmes de nature relativement simple (et parfois aussi pour les systèmes plus compliqués, en faisant appel à des moyens mathématiques suffisants), il est possible de résoudre explicitement les équations de mouvement, et de présenter le comportement sous la forme d'une formule générale. Cela, naturellement, constitue l'idéal du mathématicien. Il arrive plus souvent que nous puissions écrire les équations, mais que nous ne puissions pas les résoudre. Ou bien il y a trop d'inconnues, ou encore le système est si compliqué que toute tentative de le mettre par écrit, en détail, ferait échouer toute la recherche. Dans ces cas nous pouvons très souvent simuler le comportement du système, sous une série d'hypothèses différentes et, le cas échéant, nous faire une image de son comportement en prenant un échantillon de toutes les différentes manières qu'il peut avoir de se comporter. A défaut d'avoir la possibilité d'obtenir des solutions, la "simulation" nous fournit une deuxième ligne d'attaque.

c) Modèles descriptifs opposés aux modèles analytiques

Certains modèles cherchent uniquement à établir des relations entre stimulus et réponse pour le système en question, sans chercher à connaître les raisons de leur existence. Pour examiner les réactions d'un conducteur d'automobile, il nous suffit de prendre une série de stimuli et d'observer le délai de la réaction, sans nous arrêter à nous demander quels sont les mécanismes nerveux qui relient les deux. Cela ne nous renseignera pas beaucoup sur la physiologie du conducteur, ni sur la façon d'améliorer sa technique ; mais cela peut suffire pour nous indiquer s'il faut ou non l'autoriser à conduire un véhicule. Pour employer le jargon courant, le système est une "black-box" ("boîte noire") et nous nous contentons d'étudier les relations entre entrées et sorties, sans soulever le couvercle de la boîte

pour essayer de découvrir comment elle fonctionne. Un grand nombre de prédictions à court terme sont de cette nature.

A un moment ou à un autre, cependant, il nous arrive de vouloir regarder dans la boîte, et pas uniquement par curiosité, mais parce que nous voulons savoir comment le système fonctionnerait si certains de ses constituants essentiels venaient à être modifiés. Un modèle qui essaie de décrire le comportement à l'intérieur de la boîte peut être appelé un système "analytique". Dans une certaine mesure, tous les modèles "économétriques" sont des systèmes analytiques.

La distinction entre modèles descriptifs et analytiques est, cependant, une distinction de degré plutôt que de nature. Ainsi, par exemple, si nous construisons un modèle d'une machine thermique, on peut considérer comme suffisamment "analytique" le fait de tenir compte des relations de pression - volume - température d'un gaz, telles qu'elles sont représentées par la loi de Boyle, la loi de Charles ou diverses modifications physiques de celles-ci. Mais pour le spécialiste de la physique moléculaire, ces relations peuvent être du type de la "boîte noire", car elles expriment simplement les propriétés statistiques des mouvements moléculaires et des collisions auxquels s'intéresse ce spécialiste. Ce point acquiert une importance particulière dans les modèles macro-économiques dans lesquels la rareté des données, la complexité des faits, ou même la simple ignorance, nous force souvent à substituer des relations globales à l'ensemble des relations individuelles. La meilleure façon de s'attaquer à cette question consiste, je pense, à considérer le processus de la construction de modèles comme étant une aspiration continuelle à devenir de plus en plus "analytique", en partant d'un modèle simple, qui peut être simplement descriptif, et à pénétrer de plus en plus dans les relations causales, à mesure que la connaissance et l'expérience augmentent. Après tout, c'est bien la démarche traditionnelle de la méthode scientifique.

9 - Il existe d'autres distinctions qu'on peut faire entre les différentes classes de modèles ; on peut distinguer par exemple les modèles à court terme et les modèles à long terme, suivant la période de prédiction pendant laquelle ils doivent être utilisés ; on distinguera les modèles "programmables" ou "non programmables", suivant que le modèle est suffisamment explicite ou non pour permettre de programmer un ordinateur électronique pour l'étude numérique de son comportement ; on fera la distinction entre macro-modèles et micro-modèles, en fonction de l'étendue du but poursuivi, ou du degré d'agrégation dans la formulation des relations de base. En l'état actuel de nos connaissances, il ne faut pas trop nous soucier d'établir un système de classification complet, du moment que nous comprenons ce que ces distinctions impliquent.

PROBLEMES RELATIFS A LA CONSTRUCTION DE MODELES

10 - Je passe maintenant à la description de ce qui, selon moi, constitue le problème principal dans la construction et l'analyse de modèles. Ce qui est dit ci-après s'applique, en majeure partie, à tous les genres de modèles ; cependant la construction de modèles économiques et sociaux comporte un certain nombre de problèmes spécifiques qui lui sont propres, et

sur lesquels j'attirerai particulièrement l'attention. Mais d'abord deux remarques préliminaires :

a) Un modèle n'est valable que dans la mesure où la matière brute à laquelle il s'applique est bonne. Nous connaissons tous les difficultés énormes qu'il y a à se procurer des données satisfaisantes en matière économique. Il faut tenir compte du grand nombre d'erreurs dans certaines estimations ; des délais nécessaires pour l'obtention de certains chiffres ; des changements de base qui se produisent dans l'établissement de chiffres périodiques, comme par exemple les indices ; des périodes relativement courtes pendant lesquelles des renseignements comparables sont disponibles. Je ne veux pas minimiser les problèmes liés à la collecte des données, mais ils ne concernent pas directement cet exposé.

b) Si l'on fait la liste de toutes les difficultés auxquelles se heurte le constructeur d'un modèle économique, elle devient d'une longueur effrayante, au point de rebuter beaucoup de gens qui voudraient s'attaquer à ce sujet. Mon intention est exactement contraire. J'aimerais donc que le reste de mon exposé puisse être considéré comme consacré à la définition aussi précise que possible d'un programme de recherches, et non comme un exposé plaintif de toutes les difficultés qu'il comporte. Il est évident que nous avons un long chemin à parcourir avant d'arriver à résoudre nos problèmes ; peut-être même devons-nous passer par quelques expériences traumatisantes et refaçonner notre manière de penser fondamentale à leur sujet. Mais nous ne devons à aucun prix abandonner la partie.

LES VARIABLES

11 - Le premier problème concerne la nature des variables auxquelles nous aurons affaire. Dans les sciences physiques, ce point n'est habituellement pas grave. Tout peut s'exprimer en unités de longueur, de temps et de masse, ainsi que de charge électrique, avec peut-être quelques concepts spéciaux comme par exemple le spin électronique. De plus, ces unités sont parfaitement définies ; elles ne varient pas avec le temps et peuvent être mesurées avec une précision extrême. Parfois nous introduisons certains concepts, comme celui de force, qui ne peuvent être observés directement ; mais nous le faisons toujours d'une manière telle que le modèle puisse être vérifié par les lectures effectuées en termes d'unités fondamentales.

En matière d'économie, de sociologie et de psychologie, nous ne nous trouvons pas dans une situation aussi favorable. Nous sommes forcés de penser en termes de "valeur" ou d'"utilité", ou encore de "demande" par exemple, et il nous faut reconnaître que, même quand ces concepts sont quantitatifs, ils comportent néanmoins un côté essentiellement subjectif. Les seules unités communes sont le poids, qui, de toute façon, ne peut s'appliquer aux services, et la monnaie, dont la valeur est sujette à fluctuations. Nos étalons de mesure sont donc élastiques. Nous pouvons essayer d'amener nos séries temporelles à un stade qui les rende comparables entre elles, en introduisant des corrections pour les changements qui peuvent survenir dans la valeur des monnaies, - et c'est ce que nous faisons effectivement ; mais la valeur de la monnaie est, elle-même, un concept assez artificiel. Même dans le cas des modèles de main d'oeuvre, dans lesquels

nos unités primaires sont des êtres humains susceptibles d'être comptés, il nous faut prendre en considération la qualité, si nous voulons être tant soit peu réalistes.

12 - La question qui se pose alors est celle de savoir si nous devons admettre dans nos modèles des quantités qui sont, par essence, non observables. Personnellement, je ne vois aucune raison pour laquelle nous ne devrions pas le faire, puisque nous faisons entrer des facteurs non observables dans les équations de la physique ; mais je pense que nous devons prendre garde de ne pas matérialiser des concepts qui peuvent n'avoir aucune validité. Ainsi, par exemple, en établissant un modèle de la demande, faut-il admettre une variable "propension à la consommation", si nous ne pouvons concevoir aucune manière de la mesurer ? Nous entendons beaucoup parler ces jours-ci de "capacité productive" ; mais, cette expression est-elle suffisamment claire pour que nous puissions lui permettre de définir une variable fondamentale ?

RELATIONS ENTRE VARIABLES

13 - Les premières tentatives en vue de traduire des relations économiques par une expression mathématique ont presque toutes été exprimées en termes de relations fonctionnelles. De plus, elles étaient de nature statique, en ce sens que pour traduire, par exemple, la demande d en fonction du prix p nous écrivions :

$$d = f(p)$$

sans tenir compte de décalages dans le temps, ou de la phase de transition nécessaire pour qu'un changement de prix exerce son plein effet sur la demande. A mesure que les systèmes devenaient plus compliqués, et qu'un nombre plus grand de variables étaient introduites dans les équations, les relations étaient habituellement simplifiées et ramenées à des expressions linéaires. On savait parfaitement que la linéarité n'était qu'approximative ; mais on croyait que, dans les limites qu'on était susceptible de rencontrer dans la pratique, cette approximation serait suffisamment proche du comportement observé.

14 - Dans la plupart des cas, nous travaillons encore sur des équations linéaires ; il nous faut l'admettre, d'abord parce que les mathématiques linéaires sont les seules mathématiques faciles, et aussi parce que nous pouvons toujours soutenir que n'importe quelle courbe est presque linéaire sur un parcours suffisamment court. Mais en faisant entrer dans nos équations des variables aléatoires, nous sommes passés du modèle purement "déterministe" à un modèle "stochastique". Cela soulève des problèmes d'identification, en ce sens que nous pouvons écrire un modèle dans lequel certaines constantes ne peuvent pas être estimées, quel que soit le nombre des observations dont nous disposons, à moins d'introduire une information exogène. Cela soulève aussi quelques sérieux problèmes touchant l'estimation statistique. (Un exposé des différentes méthodes de traiter des séries d'équations stochastiques linéaires simultanées a été présenté par Fisk, 1967).

15 - Cependant, avant que nous en arrivions au problème de la résolution de notre système, il y a deux autres points qu'il convient de signaler.

D'abord, certaines des relations qui conditionnent le système peuvent être des inéquations, et non des équations. Effectivement, certains modèles d'une installation industrielle, telle qu'une raffinerie de pétrole, peuvent consister presque entièrement en contraintes exprimant, par exemple, la capacité d'admission maximale ou la production minimale requises pour faire face aux engagements contractuels. La théorie de la programmation mathématique a été créée, au cours des vingt dernières années, pour faire face à des situations de ce genre. Quand nous avons affaire à un système mixte, comprenant des égalités, de nature déterministe ou stochastique, en même temps que des inégalités exprimant les contraintes, la solution formelle des relations peut en fait devenir très compliquée et je n'oserais pas dire que ce problème ait, jusqu'ici, été maîtrisé. Pour autant que je sache, on n'a pas fait grand'chose en matière de modèles macro-économiques pour faire face à cette situation. Ainsi, dans certaines sortes de relations (comme par exemple une équation linéaire du prix en fonction de la demande), nous pouvons nous attendre à ce qu'un des coefficients soit négatif, s'il a la signification d'une élasticité ; dans certains modèles stochastiques, comme quelques-unes des quantités estimées sont des probabilités, elles doivent être positives.

LES DECALAGES DE TEMPS

16 - En second lieu, et cela est encore plus important, nous nous sommes rendu compte maintenant que le comportement de systèmes économiques dépend d'une manière essentielle des décalages de temps entre le stimulus et la réponse. Les sciences économiques classiques, quand elles allaient jusqu'à exprimer leurs relations sous une forme mathématique, le faisaient à la manière de l'équation du § 13, c'est-à-dire sous la forme d'une relation statique. Il était absolument impossible de déduire le comportement dynamique d'un système en partant d'équations de ce genre, tout comme il est impossible de déduire les lois du mouvement planétaire d'un triangle des forces, et cela explique le fait que la formulation mathématique ajoutait peu de choses, ou rien du tout, aux théories économiques. De nos jours, les "économétriciens" reconnaissent que le temps joue un rôle essentiel, et plus particulièrement dans les systèmes à "feedback".

17 - Or cela soulève toute une armée de problèmes. Il a été démontré maintenant (le professeur Stone le fait en termes simples), que le seul fait de la stabilité d'un système peut dépendre de décalages de temps, de sorte que ce décalage assume un rôle fondamental dans la structure du modèle. D'autre part, la durée d'un décalage, ou le type de la phase de transition qui va de l'application initiale du stimulus jusqu'à son équilibre final, sont parmi les effets économiques les plus difficiles à mesurer ; il n'y a donc pas lieu d'être surpris en voyant combien peu de choses nous en savons, même dans les économies les mieux documentées. Ainsi, par exemple, quel est le laps de temps nécessaire pour que le changement du taux d'escompte de la banque d'Etat exerce tout son effet, ou encore, quel est le décalage de temps entre la production et le chômage, ou entre le chômage et la pro-

duction ? A ces difficultés s'ajoutent les problèmes pratiques qui surgissent de la nature même des données économiques. Ainsi, par exemple, quand un système est tellement sensible qu'il est susceptible de réagir en quelques jours ou semaines, un modèle qui doit se baser sur des données mensuelles ou trimestrielles est susceptible d'omettre certaines réactions fondamentales.

18 - Il y a différentes façons de s'attaquer à ces problèmes. Quand le système est observé à des intervalles trop éloignés pour permettre l'établissement d'un modèle satisfaisant, nous pouvons être forcés de mener des enquêtes appropriées sur une trame plus fine. Il y a là quelques problèmes mathématiques intéressants, comme celui de trouver quelle finesse cette trame devrait avoir, ou encore de savoir s'il est rentable d'avoir des intervalles d'observations variables plutôt qu'un espacement uniforme dans le temps. Là encore, grâce aux méthodes statistiques modernes, mises en oeuvre sur ordinateur, nous pouvons faire des progrès considérables en estimant la longueur approximative des décalages entre des variables données. Il apparaît aussi, comme dans certains modèles de prévision à courte terme, que les résultats obtenus sont relativement peu sensibles aux hypothèses faites sur certaines parties du système, et cela nous mène à une nouvelle branche du sujet : l'analyse de la sensibilité (ou de savoir à quel point on peut être approximatif et prompt sans affecter par là la validité des conclusions finales).

19 - En passant, signalons un point qui est lié au recueil des données primaires. A quelques exceptions près, les modèles construits à ce jour doivent se baser sur des statistiques produites par les services gouvernementaux, ou par une autorité centrale, à des fins totalement différentes. Quand le gouvernement s'intéressera sérieusement à la construction de modèles, la nécessité se fera sentir de recueillir des données pour ce but même, et cela pourra avoir des effets lourds de conséquence, sur la nature des services de statistiques gouvernementaux. Même pour la construction d'un tableau d'entrées et de sorties - qui représente l'image instantanée d'une économie, et n'est pas compliquée (ou fort peu) par des effets de temps -, la somme de travail nécessaire à la compilation des données brutes est énorme, par comparaison avec le temps nécessaire à son application.

20 - Pour en revenir à la question du décalage de temps nous pouvons aussi constater qu'elle soulève une classe nouvelle de problèmes pour le statisticien, et même pour le philosophe. Le statisticien, habitué à travailler sur des systèmes "stochastiques", a mis au point des méthodes très subtiles pour l'estimation et le test d'hypothèses ; nous trouvons encore certains textes élémentaires qui parlent des "erreurs standard" d'une prévision, ou des "domaines de confiance" qui entourent une prédiction, comme si les incertitudes qui entourent la construction de modèles étaient de même nature que les incertitudes que nous rencontrons quand il nous faut tirer des inductions d'un échantillon pris au hasard. Ce n'est pas le cas, ou plutôt, l'incertitude liée à l'échantillonnage n'est qu'une partie de l'erreur que nous pouvons commettre. Il y a l'erreur qui consiste à choisir un modèle erroné ; l'erreur d'approximation par omission de certaines relations ; par agrégation, ou par remplacement d'une relation inconnue par une variable aléatoire ; l'erreur qui nous est imposée quand nous utilisons une variable que nous

pouvons mesurer, à la place d'une autre que nous aurions dû préférer mais que ne nous ne pouvons pas mesurer. Pour le bénéfice des statisticiens ici présents, permettez-moi d'ajouter un détail technique ; il arrive parfois, dans certains cas plus compliqués, que la surface de vraisemblance possède plusieurs modes et je ne voudrais pas exclure la possibilité qu'elle puisse avoir des sillons ou des cratères, ce qui implique qu'il nous faut réfléchir aux principes admis touchant l'induction statistique.

21 - Il y a quelques instants, j'ai fait allusion au fait que nous pouvions rencontrer des problèmes intéressants même pour le philosophe. Ils sont liés à la nature même de la causalité. La plupart des corrélations obtenues par le statisticien, par l'analyse purement statistique, sont dépourvues de contenu causal. Par exemple, la théorie standard de la régression et de la corrélation, prétend découvrir et mettre à notre disposition des schémas de dépendance qui semblent parfaitement stables et peuvent être utilisés pour la prédiction, mais qui sont en fait un non sens. Ce sont simplement des situations de "boite noire" bien que naturellement dans la pratique, nous puissions souvent trouver un lien causal grâce à des connaissances extérieures.

22 - Dans les systèmes à "feedback", il est parfois difficile de reconnaître ce qui est la cause et ce qui est l'effet ; en effet, il peut y avoir des relations dans lesquelles chacune des variables d'une paire de variables est la cause de l'autre. Ainsi, par exemple, une augmentation des salaires peut se traduire par la demande d'une production accrue, et un accroissement de la production peut se traduire par l'augmentation d'une partie du facteur rémunération : celle-là précisément qui crée des salaires plus élevés. Il n'y a aucune raison mathématique pour laquelle nous ne devrions pas établir deux relations, à condition bien entendu d'inclure des décalages appropriés pour être certains qu'elles sont consistantes. Les systèmes à "feed-back" sont de ce genre, de par leur nature. Le professeur Wold, toutefois, a réfléchi à la question en suivant des raisonnements différents, limitant les relations dans un modèle à ce qu'il appelle une "chaîne causale". Arrivé à ce point, nous pouvons simplement remarquer que, sans nous laisser enchaîner par les difficultés liées à la nature même de la causalité, un problème se pose concernant l'asymétrie des relations que nous envisageons de faire figurer dans un modèle.

23 - A ce stade, et avant de nous alarmer du nombre et de l'ampleur de quelques-uns des problèmes qui nous attendent, peut-être est-il bon aussi de mentionner quelques faits rassurants.

En premier lieu, il n'est pas nécessairement vrai que le comportement d'un système compliqué soit lui-même très compliqué ou, pour dire les choses en d'autres termes, les variables de sortie qui nous intéressent au premier degré peuvent avoir des schémas tout à fait simples et utilisables, même si le mécanisme qui leur donne naissance est hautement compliqué. Les statistiques sont pleines d'exemples de ce genre. Ainsi, par exemple, les circonstances et l'ensemble des motifs qui contribuent à déterminer le revenu d'un individu sont légion, et n'importe quel modèle qui voudrait essayer d'exposer la situation en détail serait vite embourbé dans un fatras de complexités. Cela n'empêche que la loi de Pareto sur la distribution des reve-

nus est assez étroitement suivie dans toutes les sociétés occidentales et qu'elle ne dépend que d'un seul paramètre. De plus, elle a fait preuve d'une stabilité remarquable pendant plusieurs décennies de changements fondamentaux dans les directives économiques. De même, le vote est une question de libre arbitre, par excellence, et le spectre des opinions politiques sur différents sujets est très vaste. Cela n'empêche que les lois sur le comportement des votants sont suffisamment bien comprises au Royaume Uni pour que les résultats des élections puissent être prédits avec une précision remarquable. Dans un autre domaine, Ehrenberg - auteur d'un des schémas économiques les plus généraux qui aient jamais été observés jusqu'ici - a montré que c'est la loi binomiale négative qui régit les achats des clients. Dans ma communication sur "La loi naturelle dans les sciences sociales" (1961), j'ai cité quantité d'autres exemples.

24 - Ainsi, les effets d'agrégation statistique simplifient par eux-mêmes le modèle. Il est faux de supposer que la désagrégation améliore nécessairement la représentation, ou que, du fait qu'un système est réputé consister en une masse de petits composants, chaque détail doit explicitement être inséré dans le modèle. Il me semble qu'un des devoirs de l'économétricien devrait être de rechercher pour ces modèles des schémas de comportement. On les rencontre dans les secteurs les plus inattendus et, très souvent, ils ne sont pas suggérés par une analyse logique antérieure. Nous pourrions considérer cet aspect du travail de l'économétricien comme étant analogue à certains aspects du travail du biochimiste : essayer tout ce qu'on peut imaginer, - dans l'espoir qu'à un moment quelconque une relation utile viendra au jour, - et voir ensuite comment elle fonctionne et pourquoi elle convient.

25 - Une deuxième source d'encouragement nous vient de l'ordinateur électronique. Je n'ai pas besoin de m'étendre sur ce sujet. Nous sommes parfaitement conscients que tous les modèles, à l'exception des plus simples, ont besoin d'un ordinateur pour étudier leur comportement en temps réel, c'est-à-dire suffisamment vite pour qu'ils puissent être utilisés dans une prise de décision. Il ne serait pas exagéré de dire que l'économétrie et la construction de modèles ne sont entrés dans le domaine des possibilités pratiques qu'à partir du jour où l'ordinateur fut créé. Les auteurs des débats ont exprimé bon nombre des idées actuelles ; mais la réalisation pratique par la science de l'ingénieur a dû attendre l'innovation technologique représentée par la machine électronique. Je ne crois pas qu'aucun des grands problèmes qui sont liés à la construction des modèles puisse être résolu rapidement et d'une manière élégante ; tous ces problèmes devront être lentement démêlés par une combinaison de tous les arts que nous pouvons y appliquer, et l'ordinateur sera une des machines essentielles dans ce processus.

26 - Nous pouvons aussi tirer une certaine satisfaction - peut-être pas très grande en ce moment précis, mais elle deviendra plus importante à mesure que le temps progressera - en pensant au fait que nous nous libérons graduellement d'une des grandes difficultés auxquelles l'économiste avait à faire face dans le passé : celle de l'impossibilité de se livrer à l'expérimentation. Nous pouvons déjà expérimenter, dans une certaine mesure : une

campagne de publicité peut être localisée dans une zone qui peut être comparée à une autre zone dans laquelle la campagne n'a pas été menée ; nous pouvons aussi expérimenter sur différents types d'instruction. Pour le but que nous poursuivons actuellement, il est plus important de noter que le modèle est par lui-même un instrument d'expérimentation. Pour l'instant, nous ne savons pas grand'chose touchant le comportement général de modèles de différents types ; ainsi, par exemple, nous ne savons pas si un accroissement de complexité implique nécessairement, ou probablement, une tendance à l'oscillation ; ni inversement, où et comment il convient d'insérer des circuits de feed-back pour stabiliser un système qui présente une propension au flottement ; nous ne savons pas si des mouvements cycliques du type des oscillations relâchées peuvent se produire dans un système où la capacité (du type "stock-held") est diffusée au lieu d'être concentrée en des points particuliers. De toute façon, indépendamment de la construction de modèles pour la prise de décisions, un vaste champ demeure ouvert pour explorer la question de savoir comment certains types de modèles réagissent aux stimuli.

27 - J'ai laissé pour la fin une des questions les plus importantes auxquelles nous avons à faire face : comment tester un modèle ? Comment sait-on si le modèle est bon ? Je ne conçois pas de meilleure réponse à ces questions que de dire que le test essentiel consiste à s'assurer que le modèle fonctionne. Dans la pratique, cela veut dire habituellement ceci : est-ce que le modèle remplit avec succès la mission de prédiction et de contrôle ? En cela, je crois que notre position n'est guère différente de celle de n'importe quel chercheur qui, ayant formulé une hypothèse, la teste à partir de données nouvelles, et observe dans quelle mesure elle est vérifiée. Mais le chercheur a habituellement à sa disposition une masse de données nouvelles ; il peut aussi les recueillir. Un de nos problèmes réside en ce que nous ne savons pas exactement en quoi consiste un accord satisfaisant et, dans de nombreux cas, nous ne pouvons pas attendre que l'expérience s'accumule pendant un grand nombre d'années avant d'utiliser un modèle. (Nous pouvons toujours le tester sur la base du passé, mais ce test n'est guère convaincant, surtout quand nous avons fabriqué le modèle de manière à ce qu'il s'adapte à l'expérience du passé). Pour la défense des constructeurs de modèles, pour le cas où ils auraient besoin d'être défendus, il faudrait peut-être souligner ce côté important de leur travail : à savoir que la pression des événements leur interdit souvent de se livrer à la quantité nécessaire d'essais comme on le fait, par exemple, pour le plan d'un nouvel avion, ou la mise sur le marché d'un nouveau médicament, ou même le lancement d'un produit relativement nouveau.

L'APPLICATION DES MODELES

28 - J'ai déjà fait allusion au fait qu'un modèle dépend, pour sa nature, de l'usage auquel il est destiné, et que son succès dépend de savoir s'il fonctionne. Il est clair qu'il existe différentes sortes d'usages et différents critères de bon fonctionnement ; mais notre discussion pourra être clarifiée si je trace ici quelques distinctions :

Il existe des cas où le simple concept de modèle contribue beaucoup à faire progresser notre connaissance d'un système. Pour illustrer ce point, permettez-moi d'avancer une question, sans essayer d'y répondre. La plupart des affaires commerciales ont une chaîne de commande qui s'exprime par un diagramme comparable aux branches d'un arbre généalogique, ce diagramme fonctionne pour ainsi dire dans les deux sens. Les instructions s'écoulent vers le bas, les informations remontent vers le haut ; les décisions à des niveaux définis sont prises en différents points du réseau (nous savons que cela peut être la source de difficultés, comme par exemple entre responsables des décisions et de l'invention). En dessinant l'être humain, la Nature a procédé différemment et elle a prévu au moins quatre systèmes différents pour assurer la marche du corps humain (les systèmes artériel, veineux, vasculaire et nerveux), et elle les a rattachés ensemble d'une façon très imbriquée. Quand nous considérons un organisme social ou commercial, devrions-nous détacher une page du "livre de la Nature" ? Est-ce qu'il en résulte que la chaîne d'exécution devrait être la même que la chaîne d'information ? Ou que le système des décisions devrait être le même que le système d'exécution ? Je ne connais pas de réponse à ces questions et il se peut fort bien qu'il n'y en ait pas. Ce que j'aimerais rendre clair c'est que, en pensant à une situation du point de vue du constructeur de modèles, nous pouvons être amenés à nous poser certaines questions tout à fait fondamentales touchant la structure du système étudié.

29 - Il y a aussi une distinction très utile à faire entre la prévision comme objectif en soi et le contrôle. Le modèle d'une économie peut être utile à une firme en tant que moyen de prévoir l'avenir, en ce sens qu'une firme peut vouloir prévoir l'environnement dans lequel elle se trouvera, même si ce n'est pas en vue de le contrôler directement. En revanche, le même modèle peut être utile au gouvernement pour le contrôle effectif de l'économie. Dans l'administration des affaires, je pense que l'objectif principal est le contrôle ; il arrivera même peut-être que nos modèles seront auto-contrôleurs, en ce sens qu'ils mettront automatiquement en action des forces qui dirigeront le système le long d'une ligne choisie, comme le pilotage automatique d'un avion. Il n'y a aucun conflit d'objectifs dans la planification de ces systèmes cybernétiques ; mais il peut y avoir un conflit entre usagers, en ce sens que l'industrie peut vouloir se baser sur des prévisions tirées d'un modèle, alors que le gouvernement peut vouloir les modifier. Il ne me semble pas que les modèles de contrôle soient essentiellement différents, dans leur nature, des modèles de prévision ; mais ils peuvent différer par leur genre ou par leur importance, et certainement par la quantité de relations du type "boîte-noire" que nous y insérons.

30 - Dans cet aperçu sur la construction des modèles, il m'aurait été très agréable de pouvoir dire quelque chose en réponse à une question qui nous a souvent été posée : comment s'y prend-on pour construire un modèle ? C'est là, je suppose, une de ces questions générales dans le genre de : comment dessine-t-on un bâtiment ? ou comment guérit-on une maladie ? Tout dépend de l'espèce de modèle et de l'utilisation à laquelle il sera soumis. Cela admis, il reste que nous ne sommes pas encore capables de déséquer le processus de construction des modèles. Quand un nombre suffisamment grand d'entre nous auront construit suffisamment de modèles pour suffisamment de buts différents, et auront acquis assez d'expérience sur leur

fonctionnement, peut-être sera-t-il possible d'organiser des enseignements pour constructeurs éventuels de modèles, et même de rédiger des manuels théoriques sur ce sujet. Je doute qu'on puisse faire à l'heure actuelle quoi que ce soit dans ce genre. Ce que nous pouvons faire consiste à comparer des notes, lire la littérature à ce sujet (qui est déjà suffisamment abondante) et écouter les experts nous décrire leur expérience sur des modèles en action. Et c'est là effectivement l'objet de cet exposé.

31 - Toutefois, certains faits me semblent avoir déjà émergé. Dans certains domaines limités, ou pour des objectifs limités, il peut être possible, pour un individu spécialement doué, d'avoir en lui-même toutes les rubriques nécessaires pour construire et tester un modèle. Mais je pense que les modèles relativement grands exigent l'effort d'une équipe ou tout au moins l'effort d'un individu qui peut disposer de l'appui d'une équipe. Un modèle macro-économique, par exemple, exige l'expérience analytique d'un économiste, la connaissance de données fournies par un statisticien descriptif, la science experte d'un statisticien théoricien et peut-être aussi d'un mathématicien spécialisé, l'adresse d'un programmeur de machines et le bon sens de tous réunis. La morale de tout cela me semble être que nous courons le danger d'étaler nos efforts en "couche trop mince". Si, comme je m'y attends, il y a un intérêt accru pour la construction de modèles, dans les dix ou vingt années à venir, et si l'effort qui peut être porté à ce sujet est limité par le temps, l'argent et les capacités intellectuelles, il serait rentable pour une nation (ou une communauté plus étendue), de renforcer notre action et de concentrer nos efforts sur l'établissement de groupes d'études qui dépassent la masse critique à laquelle des résultats utiles sont produits.

BIBLIOGRAPHIE

- PARKS G.M. (1964) - Development and application of a model for the suppression of forest fires. Man. Sci., 10, 760.
- FOX M. (1965) - A simplified model for the formation, movement and dissipation of fair weather cumulus clouds. J. App. Prob., 2 178.
- DILL W.R., GAVER D.P. and WABER W.L. (1965) - Models and Modelling for Manpower Planning. Man. Sci. 13, B-142.
- COOTNER P.H. (ed.) (1964) - The Random Character of Stock Market Prices. M.I.T. Press, Cambridge, Mass.
- MARKOVITZ H. (1959) - Portfolio Selection : the efficient diversification of investments. New York, J. Wiley & Sons.
- GANI J. and YEO G.F. (1965) - Some birth-death and mutation models for phage reproduction. J. App. Prob., 2, 150.
- KILBRIDGE M. and WEBSTER L. (1966) - An economic model for the division of labor. Man. Sci., 12, B-255.

- FAMA E.F. (1965) - Portfolio Analysis in a Stable Paretian Market. Man. Sci. , 11, 404.
- HORVATH W.J. (1966) - Stochastic models of behaviour. Man. Sci. , 12 , B-513.
- CHARNES A., COOPER W.W., DEVOE J.K. and LEARNER P.B. - Demon : a management model for new products. Carnegie Inst. Tech. Rep. 52.
- KENDALL M.G. (1961) - Natural Law in the Social Sciences. J. Roy. Statist. Soc. , 124, 1.
- FISK P,R. (1967) - Stochastically dependent equations in economics. Charles Griffin & Co., London.