

La simulation dans la prévision et la programmation en économétrie

Par Luigi Solari

Professeur aux Universités de Genève et de Lausanne

Exposé présenté lors de l'Assemblée annuelle
de la Société suisse de Statistique et d'Economie politique le 20 mai à Baden

I.

Dans le domaine économique, depuis un certain nombre d'années, des expériences dites de simulation ont été faites, le plus souvent en liaison avec des travaux de recherche opérationnelle [13, 14, 22]. La notion de simulation qui s'en dégage ne semble pas pouvoir se ramener à une définition unique et précise. On s'accorde toutefois pour reconnaître qu'elle recouvre un ensemble de techniques assez riches qui visent l'étude de systèmes complexes dans lesquels interviennent généralement des éléments stochastiques et dont on ne peut expliciter et prévoir le comportement par des méthodes mathématiques rigoureuses.

A l'heure actuelle, les applications des méthodes de simulation à des problèmes relevant de préoccupations propres à la science économique – et en ce sens intéressant directement l'économétrie – bien qu'elles soient plus rares, doivent retenir toute notre attention, afin notamment de dégager les grands traits d'une orientation méthodologique [2, 4, 5, 18, 28, 30, 32]. Or, en essayant de situer un instrument nouveau parmi les méthodes conventionnelles, nous sommes conduits tout naturellement à réexaminer certains aspects fondamentaux qui caractérisent ces dernières [38, 39].

II.

Comme les autres sciences, l'économétrie appelle une utilisation combinée du raisonnement théorique et de l'expérimentation¹.

Le raisonnement théorique, fondé par sa nature sur les règles de la logique, ne pourra être conduit que dans le cadre d'un système de concepts et de lois, d'un « modèle conceptuel » dont la portée est essentiellement explicative. Dépas-

¹ On envisagera ici l'expérimentation en un sens très large comme étant toute action directe ou indirecte effectuée sur une réalité donnée en vue de susciter ou de recueillir des conséquences observables. L'observation dirigée sera alors considérée comme un cas particulier de l'expérimentation.

sant la simple description de la réalité étudiée, le modèle conceptuel que l'on retient pour la représenter est conçu comme un ensemble de propositions et d'hypothèses quant à la structure du domaine et aux lois qui le régissent. De cet ensemble d'hypothèses et de propositions, on tirera les conséquences ou conclusions théoriques qu'il contient généralement de façon implicite.

La valeur et l'efficacité de la connaissance ainsi atteinte en vue de la prévision et de l'action dépendront d'une part de la fidélité de la représentation particulière du phénomène par le modèle; d'autre part de la portée explicative de celui-ci, c'est-à-dire de la force de l'éclairage qu'il projette sur la nature profonde du phénomène, sur ses composantes non observables qui en conditionnent et expliquent l'apparence observable.

La « construction » du modèle s'inspire évidemment de connaissances et d'expériences antérieures. Elle suppose toute une chaîne d'opérations, dont on ne saurait retracer les cheminements complexes, mais que l'on peut résumer par le terme commode de « conceptualisation ». Cette démarche suppose notamment une confrontation du modèle avec les faits, soit afin d'en préciser la spécification, soit encore afin de tester la fidélité de la représentation qu'il propose. Ainsi, après une première élaboration du modèle qui explicite nos hypothèses de travail, cette confrontation – fondée généralement sur les méthodes d'induction statistique, qui en conditionnent la portée – doit nous permettre soit de mieux spécifier le modèle, soit de le valider.

Quant au langage dans lequel s'exprime le modèle conceptuel, il pourra se situer à des niveaux d'abstraction différents, dictés simultanément par la complexité du phénomène étudié et par la généralité de la classe de conclusions que l'on souhaite atteindre. Les raisons qui président à ce choix sont dictées en définitive par la puissance logique du langage qui doit permettre de passer des hypothèses aux conclusions.

Afin de passer du modèle conçu comme une hypothèse de travail aux conclusions, ou à une certaine classe de conclusions, on procède généralement par voie déductive. Or, cette démarche risque de s'avérer impraticable ou inextricable avec les mathématiques connues; ou même si elle est praticable, peut demander à être illustrée partiellement dans un autre langage.

On retrouve ici les deux argumentations, d'importance inégale, que l'on avance d'habitude à l'appui des techniques de simulation. La première est certes la plus fondamentale: elle justifie alors l'utilisation de méthodes devant permettre d'induire une certaine connaissance quant aux conclusions générales du modèle. Il s'agit en quelque sorte d'analyser le modèle de façon expérimentale, afin de réaliser un échantillon de conclusions desquelles on puisse, par induction, remonter aux conclusions générales du modèle.

D'un point de vue pratique, la deuxième argumentation, qui ne retiendra pas notre attention par la suite, va toutefois au-delà d'une simple justification

de caractère didactique. Afin notamment d'atteindre une plus grande audience quant à la compréhension du contenu du modèle, on peut en effet être conduit à l'illustrer partiellement dans des langages moins abstraits, numériques ou graphiques par exemple.

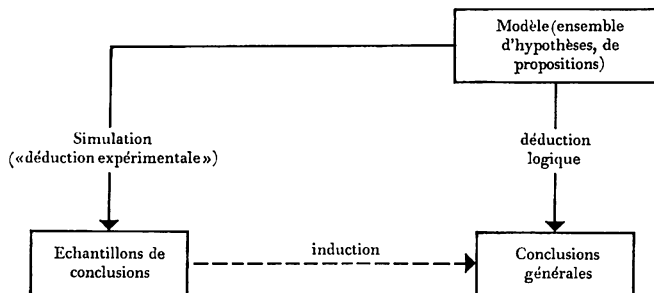
III.

Eu égard au domaine d'application offert par la science économique, il convient évidemment d'envisager la simulation au sens large. Ainsi conçue, la simulation a certes une histoire ancienne que nous ne saurions retracer, mais qui pourrait nous éclairer sur la genèse et l'évolution de la notion de modèle en tant qu'instrument de l'approche scientifique. Cette évolution nous éclairerait notamment sur les interactions entre les modèles conceptuels et les « modèles physiques », conçus comme des assemblages d'objets.

Tout en considérant la simulation au sens large [11], on ne saurait l'assimiler à la notion de modèle conceptuel. Certes les modèles conceptuels « simulent » en quelque sorte le contenu et les caractéristiques quantitatives et qualitatives des phénomènes qu'ils sont censés représenter, mais dans leur logique tout au moins, de tels modèles visent à une connaissance générale.

En les opposant aux modèles conceptuels, il nous semble donc plus correct de parler de « techniques de simulation », ces techniques visant ce que l'on pourrait appeler l'analyse expérimentale du modèle conceptuel. Dans ce sens, la réalité que l'on simule est en fait le modèle conceptuel : les différentes formes de simulation apparaissent alors comme des techniques qui interviennent en tant qu'instruments de recherche afin d'aider à explorer, à analyser le modèle conceptuel.

D'une façon schématique, on peut ainsi considérer que l'exploration du modèle par simulation doit nous permettre, par voie expérimentale, d'induire les conclusions qu'il n'est pas possible d'établir dans leur généralité par voie déductive. Le schéma ci-après illustre les deux démarches : celle de la déduction logique du modèle aux conclusions et celle que l'on pourrait appeler la « déduction expérimentale » par simulation :



En vue de l'intérêt qu'elles présentent actuellement pour l'économétrie, nous ne retiendrons ici que les techniques de simulation « directes », ainsi désignées par opposition aux techniques qui ont en vue la résolution d'un problème mathématique déterminé par simulation d'un problème différent [12].

Parmi les techniques directes, on pensera spécialement à la « simulation digitale » en raison du rôle qu'elle a déjà joué dans les applications et du rôle prépondérant qu'elle est destinée à jouer en liaison avec les problèmes économétriques de prévision et de programmation.

Evidemment, la notion de simulation ne va pas nécessairement de pair avec l'utilisation des calculateurs électroniques. Certaines expériences antérieures à la généralisation de ces moyens de calcul le montrent bien [27, 36, 50]. Toutefois, les raisons mêmes qui font que l'on doit recourir à la simulation imposent généralement la mise en œuvre de calculs qui ne peuvent être conduits que sur ordinateur.

Il convient de souligner aussi l'intérêt que peut revêtir, dans l'étude des modèles dynamiques, la « simulation analogique » [7, 23, 29, 35, 47]. En dépassant les intentions purement didactiques de certains « modèles hydrauliques », cette voie n'est pas à négliger s'il s'agit notamment de soutenir la réflexion et la formulation théoriques.

IV.

En ce qui concerne les modèles économétriques, leur spécification comporte généralement la formulation simultanée des lois stochastiques ou certaines qui régissent le phénomène étudié, ainsi que la formulation des lois stochastiques qui rattachent les éléments observables du phénomène aux éléments non spécifiés du modèle. C'est sur ces dernières lois que se fonde essentiellement l'induction statistique de type paramétrique notamment.

L'exploration du modèle visera alors la mise en évidence des conclusions découlant de ces lois. D'un côté, il s'agira d'en expliciter le contenu économique ; de l'autre, d'établir les propriétés de certaines classes de « statistiques » – c'est-à-dire de certaines fonctions des observations – devant intervenir dans les problèmes d'inférence statistique sous-jacents à la spécification du modèle. Evidemment, ces deux catégories de problèmes sont intimement liées : l'analyse du contenu économique du modèle étant tributaire des propriétés mises en évidence par l'analyse de son contenu statistique et réciproquement.

Quant aux techniques de simulation, elles semblent à l'heure actuelle intervenir le plus souvent dans des analyses du premier type, celles qui ont principalement en vue le contenu économique du modèle. Parmi de telles applications, on peut citer les travaux de *Irma et Frank Adelman* [1], qui étudient par simulation les propriétés dynamiques du modèle Klein-Goldberger, ceux de *Duesenberry, Eckstein et Fromm* [6] visant l'analyse du contenu prévisionnel

et dynamique d'un modèle macroéconomique pour les Etats-Unis, ainsi que plusieurs analyses microéconomiques [3, 5, 25, 32] de nature essentiellement théorique.

Des exemples d'application des techniques de simulation à des problèmes du deuxième type nous sont fournis entre autres par les travaux de *R. Summer* [40], de *A. L. Nagar* [24] et de *H. Wagner* [48], qui s'intéressent uniquement aux propriétés statistiques des estimateurs pour les paramètres de certains modèles économétriques à équations simultanées.

Dans tous ces travaux, l'utilisation des techniques de simulation se justifie évidemment par l'impossibilité ou les difficultés que soulève une étude analytique complète.

Quant à leur orientation, les travaux que nous venons de citer relèvent de l'une ou l'autre des deux démarches fondamentales sur lesquelles se fonde la connaissance que peut nous apporter un modèle. Toutefois, on ne saurait voir une nécessité dans la spécialisation de ces approches, mais au contraire une étape à dépasser vers une intégration véritable, dans le cadre d'un même modèle, de l'approche théorique et de l'approche expérimentale. Sur cette voie, déjà ébauchée, la contribution des méthodes de simulation paraît indispensable.

V.

Afin de mieux saisir le rôle que peuvent jouer les techniques de simulation, il convient de nous pencher de plus près sur la notion de modèle économique et sur les problèmes méthodologiques qu'elle soulève.

Pour isoler les phénomènes économiques et en établir des représentations abstraites, donc des modèles – ce qui est le propre de la conceptualisation – on est conduit tout naturellement à envisager une réalité économique déterminée, c'est-à-dire une tranche de l'économie concrète dans une perspective temporelle, sous forme d'un système évoluant dans le temps, composé :

- a) d'un ensemble de faits économiques pouvant être considéré comme internes au système considéré ;
- b) d'un ensemble de faits externes ;
- c) d'un ensemble de relations entre faits internes et externes, relations qui traduisent justement les interactions entre les faits internes eux-mêmes, et entre les deux catégories de faits.

Dans son évolution un tel système se transforme ; les faits et les relations – de nature quantitative et qualitative – se modifient, les limites mêmes entre les deux catégories de faits se déplacent. La construction d'un modèle économétrique – sa spécification, qui prend la forme d'un système mathématique – s'inspire de ce découpage du réel, qu'elle adapte et ajuste pour mettre en évi-

dence des relations suffisamment stables et autonomes. Ces relations auront une portée explicative dans la mesure où elles permettent de démontrer et de reconstruire les mécanismes fondamentaux qui régissent les transformations du système. Il s'agira en fait de mettre en évidence celle que l'on pourrait appeler la «structure invariante»¹ du système. Sa permanence dans le temps est alors essentielle, car c'est d'elle que dépend en définitive la valeur explicative et la portée opératoire du modèle.

Il est bien naturel qu'en raison de la complexité et de la mobilité du réel, on ne parvienne pas en général à appréhender dans leur totalité les mécanismes fondamentaux. On ne retiendra alors qu'une partie des faits et des relations. Le découpage d'après les catégories que nous envisagions ci-dessus, la mise en évidence des invariants du système, ainsi que leur permanence, sont évidemment liés à ce choix; celui-ci se trouve lui-même conditionné par la nature des utilisations envisagées.

Ainsi, quel que soit le degré d'élaboration du modèle, et à défaut de pouvoir atteindre une représentation parfaitement fidèle du phénomène, nous devons nous contenter de représentations partielles, dont la nature et la portée explicative sont largement fonction de la classe de conclusions que l'on a en vue. On aura par exemple des modèles de prévision, à court terme, à moyen et à long terme, de programmation, de décision, etc., modèles dont la structure variera en même temps que la nature et le niveau des hypothèses théoriques qui président à leur spécification. En raison même du caractère partiel de nos connaissances face à la complexité de la réalité économique, tous ces modèles seront contraints de se fonder sur des hypothèses largement simplificatrices. Ils seront toutefois dominés par le même souci de dégager des structures invariantes jouissant d'une certaine permanence pour qu'elles aient une portée explicative et une efficacité pratique.

VI.

Les remarques qui précèdent n'ont certes pas la prétention de suffire à éclairer les problèmes méthodologiques véritables qu'elles soulèvent. Nous nous proposons d'y consacrer maintenant notre attention dans l'optique de la prévision et de la programmation, qui représentent d'ailleurs l'aboutissement de toute recherche économétrique.

La prévision et la programmation de type économétrique se fondent sur la spécification d'un modèle; en ce sens nous les opposerons aux prévisions et aux programmations dites empiriques – sans modèle – ne se fondant que sur de simples extrapolations [8, 43, 44, 45].

¹ Il s'agit évidemment d'une notion relative qui n'a généralement de sens que dans une perspective temporelle donnée.

La description d'un système économique dans son évolution temporelle suppose que l'on puisse rattacher aux différents faits qui le caractérisent un certain nombre de variables. D'un point de vue simplement descriptif et en supposant qu'il s'agit de variables observables, on pourra alors caractériser un système donné à l'époque t par le couple Y_t, X_t des variables dites endogènes et exogènes¹. A l'époque t les premières représentent l'état du système tandis que les secondes traduisent les éléments extérieurs, l'environnement du système.

Les évolutions du système ne pourront généralement donner lieu qu'à des représentations stochastiques, que l'on s'efforcera d'expliquer en fonction des évolutions de l'environnement. L'influence de l'environnement aura alors à son origine les éléments observables X_t et des éléments non observables U_t ².

Sur tous ces éléments on reporte en quelque sorte le caractère stochastique du système. D'une façon générale, la définition d'un modèle économétrique aboutira alors à la définition du processus stochastique des éléments observables et non observables de l'environnement, ainsi qu'à celle d'une transformation permettant d'exprimer les évolutions du système en fonction des trajectoires de l'environnement.

Nous allons consacrer ici notre attention à des modèles moins généraux, plus rapprochés des formulations conventionnelles. En adoptant une représentation discrète du temps, il y a lieu de distinguer la période d'observation de l'horizon prévisionnel. Soient t_0 l'origine, $T = [t_0 + 1, \dots, t']$ la période d'observation en vue d'une prévision portant sur l'horizon $T' = [t' + 1, \dots, t'']$.

La spécification complète d'un modèle économétrique supposera alors la définition :

- d'un système f qui exprime généralement sous forme implicite les relations entre éléments endogènes et exogènes – observables et non observables – et
- d'une fonction de répartition F , donnant la loi des éléments stochastiques de l'environnement.

On aura ainsi :

$$f(Y_t, Y_{t-1}, \dots, Y_{t-\theta}, X_t, X_{t-1}, \dots, X_{t-\tau}, U_t) = 0, \quad t \in T \cup T',$$

où θ et τ , entiers positifs, traduisent la « mémoire » du système par rapport aux éléments endogènes et exogènes ;

et la fonction de répartition :

$$F(Y_{t_0-\theta}, \dots, Y_{t_0}, X_{t_0-\tau}, \dots, X_{t_0}, \dots, X_{t''}, U_{t_0+1}, \dots, U_{t''}).$$

¹ Il s'agira en fait de vecteurs : $Y_t = \|\gamma_{1t}, \gamma_{2t}, \dots, \gamma_{mt}\|$,
 $X_t = \|x_{1t}, x_{2t}, \dots, x_{nt}\|$.

² On aura : $U_t = \|u_{1t}, u_{2t}, \dots, u_{mt}\|$.

En posant :

$$\begin{aligned} Z_t &= \| Y_{t-\theta}, \dots, Y_t, X_{t-\tau}, \dots, X_t \|, \\ X_T &= \| X_{t_0+1}, \dots, X_{t'} \|, \quad U_T = \| U_{t_0+1}, \dots, U_{t'} \| \\ X_{T'} &= \| X_{t'+1}, \dots, X_{t''} \|, \quad U_{T'} = \| U_{t'+1}, \dots, U_{t''} \| \end{aligned}$$

on écrira plus simplement :

$$F(Z_{t_0}; X_T; X_{T'}; U_T; U_{T'})^1.$$

Comme nous venons de le voir une spécification complète d'un modèle peut donc être caractérisée par le couple $[f; F]$ qu'on appellera «structure», en réservant le mot de modèle à un ensemble $\mathfrak{M}$ de structures [19, 21, 38].

VII.

La distinction entre modèle et structure peut nous permettre d'éclairer trois types de problèmes qui sont évidemment intimement liés entre eux :

- a) ceux qui ont trait à la spécification du modèle;
- b) ceux qui ont trait à l'utilisation de son contenu prévisionnel et décisionnel;
- c) ceux qui relèvent de l'intervention des méthodes de simulation.

Quelles que soient l'orientation et les applications que l'on a en vue, en raison notamment des limites de nos connaissances quant aux mécanismes qui régissent les phénomènes économiques, nous savons tout au plus définir *a priori* un modèle $\mathfrak{M}$, c'est-à-dire une classe de structures. Le modèle $\mathfrak{M}$ représente alors notre hypothèse de travail. Or, ce n'est en général qu'en nous appuyant sur les éléments observables du système et de l'environnement que nous pouvons atteindre une spécification plus fine $\mathfrak{M}_0 \subset \mathfrak{M}$, à la limite la spécification d'une structure $[f; F] \in \mathfrak{M}$. L'observation de ces éléments doit ainsi nous permettre, par inférence – généralement statistique – de restreindre nos hypothèses initiales.

Evidemment la portée de cette démarche repose essentiellement sur les possibilités et les limites des méthodes d'inférence utilisées; ces possibilités et limites sont elles-mêmes liées à la nature du modèle $\mathfrak{M}$. En général le choix *a priori* de $\mathfrak{M}$ sera en partie orienté afin de faciliter l'inférence.

¹ Il convient de souligner que dans les formulations habituelles, on admet en général des hypothèses d'indépendance assez fortes pour les variables aléatoires que définit la fonction de répartition F . On est ainsi conduit le plus souvent à considérer les variables exogènes comme étant de nature certaine.

On peut encore considérer qu'une structure définit les « invariants » du système. Leur permanence est ainsi admise pour la période d'observation et pour l'horizon prévisionnel. Cette hypothèse – qui peut être très forte – est fondamentale car c'est d'elle que dépend en fait la portée des méthodes d'induction utilisées, ainsi que la portée prévisionnelle du modèle. Liée aux données envisagées, cette permanence pourra aussi bien être mise en défaut au cours de la période d'observation qu'au cours de l'horizon prévisionnel. Dans les deux cas la portée du modèle s'en ressentira, sans que nous puissions, en général, en déceler l'effet.

En ce qui concerne la période d'observation, il est parfois possible de s'affranchir de la nécessité d'observer le système et son environnement sur une longue période. On essaiera d'y parvenir en observant des systèmes différents susceptibles d'être représentés par le même modèle. Ce point de vue, qui est à la base des approches « d'analyse transversale », revient à admettre, par rapport à un modèle déterminé, la permanence des invariants pour une certaine classe de phénomènes. Il s'agit en quelque sorte d'une permanence dans l'espace, qui en général sera d'autant plus difficile à admettre que l'on se situe à des niveaux élevés d'agrégation.

Ces remarques ne font que souligner sommairement les problèmes ayant trait à la spécification du modèle et dont dépend en définitive sa portée prévisionnelle.

Quant à l'analyse du contenu prévisionnel d'une structure ou d'une classe de structures, elle revient essentiellement à expliciter les lois conditionnelles que ces structures définissent pour les évolutions du système sur l'horizon prévisionnel.

D'après la formalisation adoptée et pour l'horizon T' on pourra représenter schématiquement la forme prévisionnelle finale déduite d'une structure $[f; F]$ par le système ¹

$$Y_{T'} = g_{T'}(X_{T'}; U_{T'}; Z_{t'})$$

et la fonction de répartition conditionnelle

$$G(X_{T'}; U_{T'} / X_T; Y_T; Z_{t_0}).$$

Connaissant les valeurs de X_T et Y_T pour la période d'observation T , il s'agira, d'une façon générale, d'étudier le comportement stochastique de $Y_{T'}$ et $X_{T'}$.²

Pratiquement, quel que soit le type de prévision que l'on retienne – ponctuelle ou par régions, par exemple – cela revient essentiellement à expliciter le comportement stochastique des éléments observables. Leur loi de probabilité dépend

¹ On pose: $y_T = \|y_{t_0+1}, \dots, y_{t'}\|$ et $y_{T'} = \|y_{t'+1}, \dots, y_{t''}\|$.

² Le plus souvent on se donnera quelques évolutions $X_{T'}$ de l'environnement et on se limitera à étudier le comportement stochastique conditionnel de $Y_{T'}$.

évidemment de la spécification du modèle ainsi que des propriétés statistiques des estimateurs qui ont conduit au choix d'une structure particulière.

Les méthodes de simulation peuvent évidemment intervenir soit pour faciliter la mise en évidence du contenu prévisionnel du modèle lorsqu'une étude analytique complète s'avère impossible, soit pour faciliter l'étude des propriétés statistiques des estimateurs qui interviennent dans la spécification d'une structure, soit encore pour étudier les répercussions de ces dernières sur le contenu prévisionnel du modèle [18]. Dans les trois cas, l'utilisation des méthodes de simulation suppose l'impossibilité d'une étude analytique complète: en ce sens, ces méthodes permettent tout au plus d'atteindre une connaissance inductive, de type statistique notamment.

VIII.

Cette dernière remarque ne se veut nullement restrictive quant aux utilisations possibles des techniques de simulation; on aura recours à celles-ci pour se guider dans l'élaboration, l'analyse et la mise en œuvre d'un modèle conceptuel. Le caractère partiel des conclusions qu'elles explicitent se justifiera parfois par la plus grande fidélité des modèles qu'elles permettent de formuler et d'utiliser.

Certes, la complexité d'un modèle ne va pas nécessairement de pair avec sa fidélité, et il pourra se faire que nous ayons intérêt à utiliser des formulations relativement simples afin de pouvoir en percevoir complètement le contenu et la portée. Toutefois, il faut bien en convenir, dans l'état actuel de nos connaissances: un effort vers la mise en œuvre de modèles plus réalistes exigera en général que ceux-ci soient exprimés sous la forme de systèmes mathématiques complexes. Cette complexité dépendra essentiellement du nombre de variables, de paramètres et de relations mises en œuvre, du caractère non linéaire de ces dernières, de la présence simultanée de variables endogènes retardées, du jeu des retards et de leurs transformations, etc. Ainsi le recours aux techniques de simulation ne se justifiera pas seulement par l'introduction d'éléments aléatoires. La présence de tels éléments dans un modèle n'est pas en général la seule raison de sa complexité.

Pratiquement, les techniques de simulation devront soit nous permettre de confronter le comportement de tels systèmes avec certaines variables observables, soit nous permettre de tester la sensibilité de certaines relations et de certains paramètres, soit encore nous aider dans l'étude du contenu dynamique du modèle [18].

Dans la confrontation avec les faits, la mise en œuvre de systèmes complexes s'oppose en général à l'application des techniques statistiques conventionnelles, de type paramétrique notamment. Un dépassement de ces dernières semble possible grâce à la simulation, qui nous conduit à confronter des échantillons fictifs, engendrés par le modèle, à des échantillons d'observations réelles. Cette

démarche, qui est peut-être l'une des plus originales parmi celles que suscitent les méthodes de simulation, ne va pas sans soulever des difficultés. Une limitation importante peut résider dans la nécessité de confronter des échantillons fictifs à des observations réelles n'étant pas intervenues dans la spécification du modèle¹.

A l'heure actuelle, dans la plupart des applications économiques qui ont recours à ce type de confrontations, on se contente de conclusions largement fondées sur des appréciations empiriques quant à la concordance des échantillons observés et des échantillons fictifs produits par simulation. Sans vouloir nécessairement condamner cette façon de faire, il est bien évident qu'elle ne saurait nous satisfaire pleinement. Elle demande en effet à être dépassée, afin de donner de meilleurs fondements statistiques à de telles confrontations. Le recours à des tests portant sur la concordance de certaines caractéristiques des chroniques mises en œuvre, peut esquisser sommairement une voie qui, comme nous le disions ci-dessus, semble destinée à susciter des méthodes nouvelles dans le domaine économétrique. En élargissant le cadre des méthodes statistiques conventionnelles de l'économétrie, qui nous limitent souvent de façon très étroite dans la formalisation de nos modèles, il en découlera certainement une plus grande liberté quant aux possibilités offertes à la formulation des hypothèses théoriques qui président à leur spécification.

Les analyses dites de sensibilité se proposent essentiellement de tester le rôle respectif des différents invariants du modèle – relations, paramètres, retards – dans l'explication qu'ils fournissent des éléments endogènes. Au stade de l'élaboration du modèle, de telles analyses doivent nous permettre notamment d'aboutir à des simplifications qu'il serait difficile de retenir *a priori*. De telles simplifications permettent généralement d'améliorer la portée opératoire du modèle. En liaison avec les problèmes d'estimation et de prévision, les analyses de sensibilité pourront nous éclairer sur la stabilité de certaines composantes du modèle.

Quant aux analyses du contenu dynamique du modèle, elles ne revêtent pas seulement un intérêt théorique, même si nous sommes en général obligés d'adopter une optique temporelle de longue période, pour laquelle il serait peu réaliste d'admettre la permanence des invariants du modèle. De telles analyses, qui relèvent de l'exploration du contenu explicatif du modèle, peuvent nous éclairer sur sa portée prévisionnelle, en nous conduisant par exemple à valider ou à refuser les théories qui président à la formulation de ce dernier.

A propos des analyses du contenu dynamique du modèle, il convient de revenir sur un point évoqué précédemment, qu'elles permettent d'éclairer.

En vue d'étudier le comportement dynamique d'un modèle complexe, pour peu que l'on s'éloigne de situations linéaires, on doit se contenter d'analyses

¹ Nous verrons par la suite que l'approche microéconomique peut nous permettre de contourner cette difficulté, en partie tout au moins.

partielles par simulation [1]. Dans certains cas, pour un même modèle, en introduisant des simplifications – qui le linéarisent par exemple – on pourra procéder ensuite à une analyse mathématique complète et générale [9, 46]. On le voit, il y a là deux démarches logiquement voisines: d'un côté nous analysons partiellement un système complexe supposé plus fidèle, de l'autre nous simplifions le système pour en atteindre une connaissance générale. Un choix objectif entre ces deux démarches ne semble pas possible, et on peut même se demander si un tel choix est bien nécessaire. Dans l'opposition apparente entre les deux démarches, nous croyons plutôt déceler l'une des conclusions fondamentales qui s'impose chaque fois que l'on est conduit à utiliser les techniques de simulation. Au risque de réduire ces dernières à une sorte de pis aller, on ne saurait en général les introduire qu'afin de compléter et d'étendre la connaissance que peut nous apporter l'étude analytique complète de situations plus simples. En fait, les deux démarches doivent se compléter mutuellement.

IX.

Pour mieux souligner la nature logique et concrète des problèmes qui ont retenu jusqu'ici notre attention, nous avons distingué les modèles prévisionnels des modèles orientés vers la décision et la programmation économique, en établissant ainsi, de façon quelque peu arbitraire, une spécialisation des modèles en fonction de leur utilisation. Or, si le plus souvent on met l'accent sur l'une ou l'autre de ces orientations des modèles, il faut bien reconnaître qu'aspects prévisionnels et problèmes de décision sont intimement liés.

Cela se traduit, dans le cadre d'une structure, par la présence simultanée de variables exogènes $X_{1,t}$ sur lesquelles on ne peut pas agir, et de variables « instrumentales » $X_{2,t}$.

Pour un problème de prévision et de décision à t' portant sur l'horizon T' , la forme finale déduite d'une structure pourra s'écrire :

$$Y_{T'} = g_{T'}(X_{1,T'}; X_{2,T'}; U_{T'}; Z_{t'})$$

avec

$$G(X_{1,T'}; U_{T'}; / X_{2,T'}; X_{1,T}; X_{2,T}; Y_T; Z_{t_0}).$$

Pour la période d'observation T , les valeurs des variables exogènes non instrumentales $X_{1,T}$ et des variables exogènes instrumentales $X_{2,T}$ sont connues ainsi que les valeurs Y_T des variables endogènes. Le problème de décision portera alors sur le choix de « politiques optimales » caractérisées par des valeurs des variables instrumentales $X_{2,T'}$ pour l'horizon considéré.

La recherche des politiques optimales par voie analytique suppose que l'on puisse définir une « fonction objectif », qui en général dépendra des valeurs des

variables endogènes et exogènes pour l'horizon T' ainsi que des variables prédéterminées à l'époque t' .

Or, quels que soient les critères de décision adoptés, les difficultés rencontrées dans la recherche par voie analytique d'une politique optimale – ou d'une classe de politiques optimales – ne dépendront pas seulement de la complexité du modèle, mais encore des problèmes statistiques qui président à la spécification d'une structure. On connaît bien les difficultés de calcul qui limitent sensiblement la forme des modèles de programmation, même en l'absence d'éléments aléatoires. En ce qui concerne la programmation économétrique, à de telles limites viendront s'ajouter les problèmes posés par l'estimation du modèle. On retrouve ici des problèmes analogues à ceux que nous évoquions précédemment à propos des modèles prévisionnels et qui peuvent ainsi justifier le recours aux techniques de simulation.

Des raisons nouvelles d'y avoir recours découleront des difficultés que soulève la spécification d'une « fonction objectif » et son utilisation en vue d'aboutir à des solutions par voie analytique. Dans le cadre d'un modèle économétrique, la spécification d'une « fonction objectif » ayant un sens concret véritable, peut être une ambition excessive, qui suppose en particulier que l'on sache définir *a priori* des préférences collectives pour un horizon déterminé.

Compte tenu des restrictions quant à leur généralité, les techniques de simulation peuvent intervenir ici de deux façons voisines. D'une part, afin de nous permettre d'explorer les implications du modèle et d'éclairer ainsi la formulation d'une « fonction objectif » qui servira dans une étude analytique ultérieure. D'autre part, en nous affranchissant de la nécessité de définir une « fonction objectif », les techniques de simulation peuvent nous permettre de comparer un ensemble de « politiques » à leurs effets [16, 17]. Dans les deux cas, et en considérant un modèle stochastique, il s'agira de déterminer pour l'horizon T' des échantillons d'« évolutions » des variables endogènes, pour différentes évolutions des variables exogènes et des instruments.

X.

Jusqu'ici, nous avons considéré des systèmes économiques évoluant dans le temps sans spécifier le niveau d'agrégation auquel se situe la représentation proposée par le modèle. En ce qui concerne les modèles de prévision et de programmation – qui ont retenu plus particulièrement notre attention – on est le plus souvent obligés de se situer d'emblée à un niveau d'agrégation assez élevé. Il n'empêche que les remarques qui précèdent s'appliquent quel que soit ce niveau.

En tenant compte maintenant de cette nouvelle dimension, il s'agit de voir rapidement comment elle peut éclairer notre propos et nous conduire à le compléter.

Entre l'étude des mécanismes et des relations au niveau des unités économiques élémentaires – agents économiques et centres de décision – et celle de l'état et des variations des grandeurs globales qui caractérisent l'activité économique d'une nation ou d'une collectivité humaine dans son ensemble, entre ces deux limites extrêmes du micro et du macroéconomique, les niveaux auxquels peut se situer la formulation du modèle sont nombreux. On se rapproche toutefois de l'un ou l'autre des niveaux extrêmes selon que l'attention se porte plus particulièrement sur les mécanismes des actions et des décisions individuelles, considérées dans leur juxtaposition, ou qu'on essaie d'en effectuer la synthèse pour dégager des lois globales.

La macroéconomie formule des lois qui régissent des ensembles et non des individus : mais elles ont toutefois nécessairement à leur origine des actions et des comportements individuels. Or, le passage des formulations microéconomiques aux formulations macroéconomiques n'est pas toujours aisé ni même possible. Les problèmes d'agrégation soulevés par cette démarche butent en effet souvent contre des impossibilités qui ne font que souligner le caractère partiel et orienté de nos connaissances théoriques. Partiel, car les explications microéconomiques ne se transposent pas toujours simplement à l'échelle macroéconomique, de même que les explications macroéconomiques ne se fondent souvent que sur des hypothèses microéconomiques largement simplificatrices. Caractère orienté car la nature des explications et des observations possibles dicte souvent le choix de leur niveau et celui-ci dépend encore de l'utilisation particulière de la classe de conclusions que l'on envisage.

Sans revenir sur les limites quant à la généralité des conclusions que permettent d'atteindre les méthodes de simulation, ces dernières remarques nous amènent à esquisser tout un domaine de l'utilisation des techniques de simulation qui peut accroître notre connaissance opératoire des phénomènes économiques. Il s'agit essentiellement : d'une part d'améliorer notre connaissance des mécanismes fondamentaux au niveau même où les phénomènes économiques se créent ; et d'autre part de permettre la transposition de la connaissance ainsi acquise à des niveaux plus agrégés où se situent en général les conclusions opératoires que nous souhaitons atteindre.

D'assez nombreux travaux répondent au premier souci. Par la simulation de ménages, d'entreprises, de marchés, de situations de lutte d'intérêts, etc., de tels travaux sont naturellement amenés à recouvrir les grands chapitres de l'analyse microéconomique [3, 4, 5, 25, 32, 49]. Dans cette optique, les problèmes méthodologiques correspondent essentiellement à ceux que nous évoquions précédemment.

Une voie nouvelle, partiellement explorée, mais répondant au même souci de mieux connaître les phénomènes microéconomiques, semble se dégager des possibilités qu'offre la simulation – digitale ou non – avec intervention d'élé-

ments humains. Des expériences telles que les jeux d'entreprise, initialement conçues dans un but didactique ou d'entraînement, peuvent revêtir un intérêt scientifique dans la mesure où elles nous conduisent à formuler ou à vérifier des hypothèses de comportement [20, 34]. Sans vouloir exagérer l'apport que l'on est en droit d'attendre de telles méthodes, on peut remarquer que dans leur logique tout au moins, elles se rapprochent des conditions expérimentales des sciences dites de laboratoire. Certes, les limites de ces procédés sont évidentes et de poids. En effet de tels procédés dépendent essentiellement du choix des éléments humains qui interviennent dans l'expérience de simulation, ainsi que des interactions qui s'établissent entre ces éléments humains et l'environnement simulé, qui est en fait un modèle partiellement structuré. Il sera en général très difficile de s'assurer que cette représentation « expérimentale » d'une réalité donnée atteint un certain degré de fidélité. On ne saura alors utiliser les conclusions qu'elle propose qu'à titre indicatif, en vue de l'élaboration d'autres modèles.

Revenons maintenant au second point évoqué ci-dessus et qui a trait au passage de formulations microéconomiques à des conclusions se situant à des niveaux d'agrégation plus élevés. Les méthodes de simulation n'interviendront pas seulement pour éclairer cette démarche, ce qui relève en définitive de l'appui qu'elles peuvent apporter à l'analyse de systèmes complexes. C'est en permettant de combiner cette démarche avec l'approche microéconomique, en tout cas en permettant de mettre en œuvre des résultats agrégés en les déduisant de la spécification d'un modèle moins agrégé, que réside peut-être le principal intérêt des méthodes de simulation. En facilitant cette approche, qu'illustrent notamment les travaux dirigés par *Orcutt* aux Etats-Unis [10, 26, 28], les méthodes de simulation peuvent contribuer à accroître la fidélité de nos modèles ; et ceci au double point de vue des formulations théoriques qui président à leur élaboration et des démarches qui nous permettent de les confronter avec les faits, soit afin de les tester, soit afin de mieux spécifier le modèle.

En nous affranchissant de la nécessité de spécifier d'emblée des relations macroéconomiques, nous sommes amenés à expliciter nos hypothèses de travail à un niveau plus rapproché, ou au niveau même où se créent les phénomènes économiques, ce qui doit accroître la portée explicative de ces hypothèses.

Certaines relations pourront alors être testées ou spécifiées séparément, en utilisant pour cela des données statistiques – fournies par des enquêtes, par exemple – qui ne sauraient intervenir directement dans une spécification plus agrégée. De plus, on pourra tester globalement la formulation microéconomique en comparant les valeurs des variables agrégées qui s'en déduisent, aux valeurs réellement observées. De cette façon, on contournera souvent les difficultés que soulève la comparaison d'observations simulées à des observations réelles ayant déjà contribué à la spécification du modèle.

Sans nous étendre plus longuement sur l'intérêt évident de cette approche, qui, en raison de la complexité des modèles mis en œuvre ne pourrait être envisagée sans l'appui des techniques de simulation, il convient de souligner qu'elle doit nécessairement s'accompagner d'un effort théorique et expérimental accru.

Ici encore l'intérêt et la portée des techniques de simulation dépendra essentiellement de l'effort conceptuel et méthodologique que celles-ci suscitent et sur lequel elles doivent nécessairement s'appuyer. Ainsi parviendrons-nous, en élargissant le cadre des formulations conventionnelles, à des représentations plus fidèles et plus efficaces des phénomènes économiques.

Bibliographie

- [1] *Adelmann, I. et F.*, The Dynamic Properties of the Klein-Goldberger Model, dans: *Econometrica*, vol. 27, 4, 1959, p. 596-625.
- [2] *Babb, E. M. et French, C. E.*, Use of Simulation Procedures, dans: *Journal of Farm Economics*, vol. 45, 4, 1963, p. 876-877.
- [3] *Billstrom, F. et Thore, S.*, Simulation Experiments with Dynamic Price Strategies in Monopoly Theory, dans: *Econometric Model Building, Essays on the Causal Chain Approach*, Amsterdam, North-Holland Publishing Co., 1964, p. 297-521.
- [4] *Clarkson, G. P. F. et Simon, H. A.*, Simulation of Individual and Group Behavior, dans: *The American Economic Review*, vol. L, 5, 1960, p. 920-932.
- [5] *Cohen, K. J. et Cyert, R. M.*, Computer Models in Dynamic Economics, dans: *The Quarterly Journal of Economics*, LXXV, 1961, p. 112-127.
- [6] *Duesenberry, J. S., Eckstein, O. et Fromm, G.*, A Simulation of the United States Economy in Recession, dans: *Econometrica*, vol. 28, 4, 1960, p. 749-809.
- [7] *Enke, S.*, Equilibrium among Spatially Separated Markets: Solution by Electric Analogue, dans: *Econometrica*, vol. 19, 1, 1951, p. 40-47.
- [8] *Frisch, R.*, Preface to the Oslo Channel Model - A Survey of Types of Economic Forecasting and Programming, dans: *Europe's Future in Figures*, Amsterdam, North-Holland Publishing Co., 1962, p. 248-286.
- [9] *Goldberger, A. S.*, *Impact Multipliers and Dynamic Properties of the Klein-Goldberger Model*, Amsterdam, North-Holland Publishing Co., 1959.
- [10] *Greenberger, M.*, Simulation of a Complex Economic System, dans: *Actes du II^e Congrès international de recherche opérationnelle*, (Aix-en-Provence, 1960), Paris, Dunod, 1961, p. 511-517.
- [11] *Guetzkow, H.*, *Simulation in Social Science, Readings*, Englewood Cliffs New York, Prentice Hall Inc., 1962.
- [12] *Hammersley, J. M. et Handscombe, D. C.*, *Monte-Carlo Methods*, London, Methuen & Co. Ltd., 1965.
- [13] *Harling, J.*, Simulation Techniques in Operations Research - A Review, dans: *Operations Research*, vol. 6, 3, 1958, p. 307-319.

- [14] – Simulation Techniques in Operational Research, dans: *Operational Research Quarterly*, vol. 9, 1, 1958, p. 9–21.
- [15] Haurie, A. et Duguay, C.R., Méthode de Monte-Carlo: problèmes d'utilisation, dans: *L'Actualité économique*, 3, 1964, p. 577–593.
- [16] Holland, E.P. et Gillespie, R.W., *Experiments on a Simulated Underdeveloped Economy: Development Plans and Balance-of-Payments Policies*, Cambridge (Mass.), The M.I.T. Press, 1963.
- [17] Holland, E.P., Simulation of an Economy with Development and Trade Problem, dans: *The American Economic Review*, vol. LII, 3, 1962, p. 408–430.
- [18] Holt, Ch. C., Validation and Application of Macroeconomic Models Using Computer Simulation, dans: *The Brookings Quarterly Econometric Model of the United States*, Chicago, North-Holland Publishing Co., 1965, p. 636–650.
- [19] Hurwicz, L., Generalization of the Concept of Identification, dans: *Statistical Inference in Dynamic Economic Models*, New York, John Wiley & Sons Inc., 1950, p. 245–300.
- [20] Kaufmann, A., La simulation des phénomènes économiques où intervient la concurrence, dans: *Les Choix Economiques – Décisions séquentielles et simulation*, Paris, Dunod, 1960, p. 299–355.
- [21] Koopmans, T. C. et Hood, W.C., The Estimation of Simultaneous Linear Economic Relationship, dans: *Studies in Econometric Method*, New York, John Wiley & Sons, Inc., 1961, p. 112–199.
- [22] Malcolm, G. D., Bibliography on the Use of Simulation in Management Analysis, dans: *Operations Research*, vol. 8, 2, 1960, p. 169–177.
- [23] Morehouse, N.F., Strotz, R.H., et Horwitz, S.J., An Electro-Analog Method for Investigating Problems in Economic Dynamics: Inventory Oscillations, dans: *Econometrica*, vol. 18, 4, 1950, p. 313–328.
- [24] Nagar, A.L., A Monte-Carlo Study of Alternative Simultaneous Equation Estimators, dans: *Econometrica*, vol. 28, 3, 1960, p. 573–590.
- [25] Nevins, A.J., Some Effects of Uncertainty: Simulation of a Model of Price, dans: *The Quarterly Journal of Economics*, vol. LXXX, 1, 1966, p. 73–87.
- [26] Orcutt, G. H., Greenberger, Korbet, J., Rivkin, A., *Microanalyses of Socioeconomic System: A Simulation Study*, Harper International Student Reprint, 1961, p. 240 s.
- [27] Orcutt, G. H., A Study of the Autoregressive Nature of the Time Series Used for Tinbergen's Model of the Economic System of the United States, dans: *Journal of the Royal Statistical Society, Serie B*, X, 1, 1948, p. 1–53.
- [28] – Simulation of Economic Systems, dans: *The American Economic Review*, vol. L, 5, 1960, p. 893–907.
- [29] Phillips, A.W., Mechanical Models in Economic Dynamics, dans: *Economica*, vol. XVII, 65–68, 1950, London, The London School of Economics and Political Science, p. 283–305.
- [30] Robinson, E. A., Recursive Decomposition of Stochastic Processes, dans: *Econometric Model Building, Essays on the Causal Chain Approach*, Amsterdam, North-Holland Publishing Co., 1964, p. 111–168.
- [31] Rosenstiehl, P. et Ghouila-Houri, A., *Les choix économiques – Décisions séquentielles et simulations*, Paris, Dunod, 1960.

- [32] Shubik, M., Simulation of the Industry and the Firm, *The American Economic Review*, L, 5, 1960, p. 908–919.
- [33] Shupp, F.R., A Dynamic Programming Model for Strategic Materials, dans: *The Review of Economics and Statistics*, vol. XLVI, 1, 1964, p. 90–98.
- [34] Siegel, A. et Fouraker, L.E., *Bargaining and Group Decision Making, Experiments in Bilateral Monopoly*, New York, McGraw-Hill, 1960.
- [35] Simon, H.A., On the Application of Servomechanism Theory in the Study of Production Control, dans: *Econometrica*, vol. 20, 2, 1952, p. 247–268.
- [36] Slutsky, E., The Summation of Random Causes as the Source of Cyclic Processes, dans: *Econometrica*, vol. 5, 2, 1937, p. 105–146.
- [37] Snyder, W.W., Money in a Developing Economy: A Case Study of Pakistan, 1953–1961, dans: *The Review of Economics and Statistics*, vol. XLVI, 4, 1964, p. 413–420.
- [38] Solari, L., Contenu et portée des modèles économiques. dans: *Dialectica*, vol. 17, 4, 1963, p. 328–352.
- [39] – L'économétrie, recherche d'une synthèse entre expérience et théorie, *Publication de la Faculté des sciences économiques et sociales de l'Université de Genève*, vol. XVII, Genève, Librairie de l'Université, 1965.
- [40] Summers, R., A Capital-Intensive Approach to the Small-Sample Properties of Various Simultaneous Equation Estimators, dans: *Econometrica*, vol. 27, 2, 1959, p. 302–303.
- [41] Suttor, R.E. et Crom, R.J., Computer Models and Simulation. dans: *Journal of Farm Economics*, vol. 46, 5, 1964, p. 1341–1350.
- [42] Theil, H., Decision Rules and Simulation Techniques in Development Programming, dans: *Study Week on the Econometric Approach to Development Planning*, Amsterdam, North-Holland Publishing Co., 1963, p. 465–493.
- [43] – *Optimal Decision Rules for Government and Industry*, Amsterdam, North-Holland Publishing Co., 1964, p. 69 ss.
- [44] – *Economic Forecasts and Policy*, Amsterdam, North-Holland Publishing Co., 1965.
- [45] – *Applied Economic Forecasting*, Amsterdam, North-Holland Publishing Co., 1966.
- [46] Theil, H. et Boot, J. C. G., The Final Form of Econometric Equation Systems, dans: *Revue de l'Institut international de statistique*, vol. 30, 2, 1962, p. 136–152.
- [47] Tustin, A., *The Mechanism of Economic Systems*, Heinemann, 1953.
- [48] Wagner, H.M., A Monte-Carlo Study of Estimates of Simultaneous Linear Structural Equations, dans: *Econometrica*, vol. 26, 1, 1958, p. 117–133.
- [49] Yance, J.V., A Model of Price Flexibility, dans: *The American Economic Review*, L, 3, 1960, p. 401–418.
- [50] Yule, G., Why Do We Sometimes Get Nonsense Correlations between Time Series?, dans: *Journal of the Royal Statistical Society*, 1926, 89, p. 1–64.
- [51] Zusman, P. et Amiad, A., Simulation: A Tool for Farm Planning under Conditions of Weather Uncertainty, dans: *Journal of Farm Economics*, vol. 47, 3, 1965, p. 574–594.