

SÉMINAIRE DE PHILOSOPHIE ET MATHÉMATIQUES

JEAN-LOUIS DESTOUCHES

Systemes, modèles, prévisions

Séminaire de Philosophie et Mathématiques, 1977, fascicule 1
« Systemes, modèles, prévision », , p. 1-19

http://www.numdam.org/item?id=SPHM_1977__1_A1_0

© École normale supérieure – IREM Paris Nord – École centrale des arts et manufactures,
1977, tous droits réservés.

L'accès aux archives de la série « Séminaire de philosophie et mathématiques » 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/>

SYSTEMES, MODELES, PREVISIONS

par J.L. DESTOUCHES

Ecole Normale Supérieure
Séminaire de Philosophie et Mathématiques (Maurice LOI)

12 janvier 1977

I. INTRODUCTION :

Il me semble que l'un des thèmes les plus intéressants de la méthodologie scientifique contemporaine est celui des systèmes, des modèles et des prévisions. Il pose le problème capital de construire une théorie générale des systèmes qui englobe les diverses conceptions actuelles dans différents domaines de la pensée scientifique.

Dans son exposé de la théorie générale des systèmes, dont la première édition remonte à 1968, Ludwig Von Bertalanffy (1) fait remonter ses premières conceptions aux années 40. L'étude des systèmes à contre-courant, dans le contexte épistémologique de l'époque, cherchait, en effet, déjà, à se faire jour. Je m'étais moi-même intéressé à la notion de système physique dès ma thèse (2) en 1933. J'étais parti de considérations techniques liées à la physique théorique, et j'avais intitulé ma seconde thèse : "Principes de la mécanique générale" (3) par analogie avec l'Analyse générale de Maurice Fréchet (4) dont j'utilisais les techniques mathématiques. Qu'on m'excuse de me citer moi-même : j'écrivais, quelques années plus tard "La notion de système physique demeure la notion la plus fondamentale de toute la physique. Elle prend naissance dans les idées de découpage de la réalité indifférenciée, de morcellement, et d'autre part, dans les idées de permanence d'une partie d'un morcellement" (5).

Ensuite, pour essayer de mieux comprendre les théories quantiques, j'ai pensé qu'il fallait séparer, dans la formulation de ces théories ce qui était proprement physique de ce qui était purement prévisionnel. Pour cela, dès 1936, j'ai cherché à construire une théorie générale des prévisions, que j'ai peu à peu perfectionnée au cours des

années, et appliquée à d'autres domaines que la physique, notamment à l'économie et à la biologie.

2. CLASSIFICATION DE VON BERTALANFFY

Avant d'entrer dans le détail des remarques que je voudrais présenter au sujet des systèmes et des prévisions, je crois utile de citer la description, et la classification que Von Bertalanffy a fourni de sa théorie générale des systèmes, car elles précisent bien ce qu'on a appelé le point de vue "systémique" dans le contexte scientifique et philosophique des 40 dernières années. Je montrerai ensuite, en quoi mes propres essais, visant à une théorie générale des prévisions, se situent par rapport à ce point de vue, en quoi elles tendent à aller au-delà. Von Bertalanffy signale qu'on peut évidemment limiter le sens du terme "théorie générale des systèmes" au sens technique d'une théorie mathématique; mais, dit-il, ce n'est pas recommandé, parce qu'il y a de nombreux problèmes systémiques qui ne sont pas encore formulables en termes mathématiques et il emploie l'expression de théorie générale des systèmes, en un sens large. Ce même point de vue élargi se trouvait défendu par M. THOM dans son récent article du Monde*, sur la théorie des catastrophes.

Mais ceci ne doit pas nous faire oublier que si le point de vue de Von Bertalanffy doit entrer avec succès en rivalité avec la mentalité analytique de la science classique, ce ne pourra être que grâce à un emploi aussi élaboré des mathématiques que celui qu'elle en fait. Là est la faiblesse de von Bertalanffy : ses conceptions mathématiques sont trop étroites et trop particulières. D'autres auteurs ont réussi à utiliser, pour certains systèmes, des techniques mathématiques réellement efficaces, par exemple Prigogine (6) et surtout Thom (7).

Selon von Bertalanffy, on peut accéder au champ des recherches systémiques :

1°) soit en acceptant un modèle ou une définition de ce qu'on appelle "système", et en essayant ensuite d'en tirer une théorie consistante.

2°) soit en partant de problèmes qui se sont posés dans différentes sciences, pour montrer la nécessité d'un point de vue général et de développer, avec plus ou moins de détails, en une succession d'exemples.

C'est ce dernier type d'introduction que von Bertalanffy a choisi pour présenter sa théorie. Mais je me placerai ici plutôt au

premier point de vue. Je présenterai une certaine conception de la notion de système et des processus épistémologiques concernant les systèmes, et j'essayerai de montrer comment des distinctions importantes et une théorie générale peuvent en découler.

(*) Le Monde, 22 décembre 1976, p.17.

Mais voyons d'abord la classification de von Bertalanffy. Il distingue 3 principaux aspect :

1°) La science des systèmes :

elle constitue en une exploration et une théorie des systèmes dans les différentes sciences (physique, biologie, psychologie, sciences sociales) et une théorie générale des systèmes, considérée comme l'ensemble des principes s'appliquant à tous les systèmes ou à des sous-ensembles déterminés de systèmes.

Contrairement à la science classique, nous savons maintenant que, pour comprendre, non seulement la connaissance des éléments mais aussi celle de leurs inter-relations est nécessaire. En outre, il y a des aspects généraux, des correspondances et des isomorphismes communs à plusieurs "systèmes". C'est proprement le domaine de la théorie générale des systèmes qu'une exploration des "totalités". L'idée de totalité, longtemps considérée comme métaphysique est traitée maintenant par la théorie dynamique des systèmes, la cybernétique, la théorie des automates, les théories des ensembles, des réseaux, des graphes, etc.

2°) La technologie des systèmes :

Des problèmes se posent dans la technologie et la société modernes, incluant et le hardware ou matériel et le software ou logiciel constitués par les nouveaux développements et disciplines. Dans la technologie et la société contemporaine, il y a besoin de recherches interdisciplinaires, car il y a des problèmes essentiellement systémiques, c'est-à-dire concernant les relations d'un grand nombre de variables. Les exigences technologiques ont conduit à des conceptions et des disciplines nouvelles, originales, introduisant des notions de base telles que théories de contrôle et de l'information, des jeux, de la décision, des circuits, des files d'attente, de la fiabilité, etc. Toutes théories émergeant de besoins particuliers mais se révélant comme

valables hors de leur domaine originel d'application, comme de nombreux exemples le montrent (par exemple, modèles de feed-back isomorphes dans les systèmes mécaniques, hydrodynamiques, électriques, biologiques, etc.). Il y a un spectre de considérations allant de la théorie mathématique hautement sophistiquée jusqu'à la simulation par ordinateur et la discussion non formelle des problèmes de caractère systémique.

A ce niveau appartient un processus complexe que j'avais appelé autrefois "synthèse inductive" (8). De la synthèse inductive se dégagent diverses structures attribuées au système. On peut ensuite les comparer à l'expérience considérée d'une manière globale et non pas constituée seulement par quelques mesures isolées. De cette confrontation à l'expérience ressort l'adéquation ou l'inadéquation des structures dégagées par la synthèse inductive. Ces structures globales s'expriment le plus souvent par l'utilisation de modèles dont on vérifie l'adéquation ou l'inadéquation globales.

3°) Philosophie des systèmes :

Elle se dégage de la réorientation de la pensée et de la conception du monde qui dérive de l'introduction de l'idée de "système" comme nouveau paradigme scientifique, en contraste avec le paradigme analytique mécaniste et causal de la science classique.

La théorie générale des systèmes comporte un aspect philosophique et implique une nouvelle philosophie de la nature envisageant le monde comme une grande organisation.

D'où trois parties : 1) il faut comprendre en quoi consiste un système, et comment des systèmes se manifestent à divers niveaux de l'observation. C'est l'ontologie des systèmes. La réponse à la question : "qu'est-ce qu'un système ?" n'est ni évident ni triviale. Ceci conduit alors à l'épistémologie des systèmes. Elle est profondément différente de l'épistémologie du positivisme logique reposant sur des bases physicalistes, atomistiques, et réductionnistes. Elle conduit à une vue perspective. Enfin, la 3ème partie de la philosophie des systèmes concerne les relations de l'homme et du monde, ou en d'autres termes les valeurs.

3. SYSTEMES ET MODELES

Revenons aux deux modes possibles de présentation d'une théorie générale. Si je me réfère aux circonstances particulières qui m'ont conduit à élaborer une théorie générale des prévisions, c'est au caractère prévisionnel de la mécanique quantique qu'il me faut

remonter. Cette théorie était la première à présenter certaines caractéristiques entièrement nouvelles. En effet, on y calcule à partir de connaissances initiales les probabilités pour qu'un résultat de mesure d'une certaine grandeur observable A soit tel ou tel, si à un instant t futur on effectue une mesure de cette grandeur A sur le système étudié.

Dans les années 30, on cherchait à bien comprendre la signification des principes de cette théorie qui avaient été trouvés quelques années auparavant. Il m'a semblé alors que la première étape pour arriver à une bonne compréhension de ces principes devait être de bien séparer ce qui était dû à la formulation en termes de prévisions de ce qui était proprement physique. Pour réaliser cette séparation, il m'a paru nécessaire de construire une théorie générale des prévisions indépendamment de toute considération physique.

J'ai construit une telle théorie dans les années 1935-36, et l'ai exposée dans divers cours et ouvrages cités ici.

Après la guerre, à la suite des études faites aux Etats-Unis concernant la recherche opérationnelle, l'utilisation de mathématiques et de probabilités dans le domaine des sciences économiques s'est beaucoup développée et j'ai pensé que ma théorie générale des prévisions pouvait aussi s'appliquer au domaine socio-économique.

Ces dernières années dans beaucoup de domaines, art de l'ingénieur, économie, biologie, médecine, la mode est venue d'utiliser des modèles et de développer une théorie des systèmes. On a été ainsi amené à utiliser les notions de "système" et de "modèle" dans de nombreux domaines.

Tous ces développements récents m'ont conduit à reprendre ma théorie des prévisions et à l'élargir de façon à contenir tous les aspects qui sont aujourd'hui nécessaires pour disposer d'un cadre précis permettant d'aborder une classe assez large de problèmes qui se posent actuellement. Dans cette perspective élargie, le problème de la mécanique quantique n'est plus qu'un cas tout à fait particulier.

Je me propose de vous exposer les idées fondamentales qui m'ont guidé dans cette élaboration d'une théorie des systèmes et des prévisions.

On peut dire, peut-être d'une façon sommaire mais qui suffit comme point de départ, que "système" pris dans son sens le plus général revient à la notion "d'objet d'étude".

Mais n'importe quoi ne constitue pas un objet d'étude possible. Il faut qu'il soit suffisamment déterminé, qu'il soit reconnaissable à cours du temps, et qu'il évolue de façon suffisamment autonome pour constituer un ensemble formant un tout évoluant dans son environnement. Un système pris dans ce sens possède une structure, et c'est cette structure qui avant tout le caractérise et lui imprime son unité. Dans la notion intuitive de système se trouve impliquée la complexité; un système est un objet d'étude complexe. Deux méthodes complémentaires vont intervenir dans son étude : une méthode d'analyse conduite selon la méthode cartésienne pour en dégager la composition et la structure et une méthode "systémique" de considération globale du système avec une étude initiale globale et sommaire qu'on précise peu à peu au fur et à mesure du développement de l'étude. Pour qu'une telle étude soit précise, il faut construire une représentation mathématique du système et c'est là le point le plus important. Cette représentation constitue un "modèle" du système. Dans un article récent, j'ai indiqué les conditions de la modélisation (10). C'est alors que se pose le problème de la cohérence du modèle. Il faut d'abord prouver que l'on a bien une représentation mathématique du système. Pour cela j'utilise une méthode que j'ai appelée la "méthode du schéma". Il faut prouver que les équations et inéquations apparaissant dans le modèle du système sont compatibles, c'est-à-dire qu'elles ont bien des solutions au moins dans certains cas particuliers.

4. SYSTEME ET UNIVERS

Un système est toujours plongé dans un tout qu'on peut appeler "univers". Les moyens humains de description étant limités, on ne peut décrire cet univers dans le détail, mais seulement d'une façon sommaire, qu'il s'agisse de l'univers physique ou de l'univers économique constitué par l'économie mondiale.

Dans cet univers, on distingue une partie que l'on décrit plus en détail, et c'est cette partie qui constitue le système étudié ;

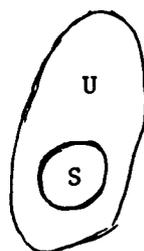


Fig. 1

le reste sera appelé "environnement" ou extérieur du système. Mais toute partie de l'univers considéré ne constitue pas un système; pour qu'il en soit ainsi, il faut que cette partie satisfasse à deux conditions dont j'ai déjà parlé : il faut 1°) qu'elle ait une certaine permanence dans un intervalle de temps et soit reconnaissable malgré les transformations qu'elle subit, et 2°) qu'elle ait une autonomie d'évolution à une certaine approximation. Le lien entre le système et son environnement est toujours décrit sommairement mais diverses approximations peuvent être utilisées.

Quand on distingue un système dans un tout, on établit une situation artificielle par la coupure système-environnement.

En 1ère approximation, un système pourra être considéré comme isolé. Dans une 2ème approximation, on atténue la coupure en tenant compte de l'environnement par une action moyenne donnée, comme en mécanique terrestre on tient compte de l'environnement par le champ de pesanteur. On peut aussi élargir le système pour constituer un système plus faiblement couplé avec l'extérieur.

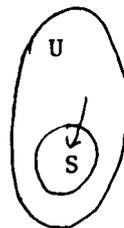


Fig. 2

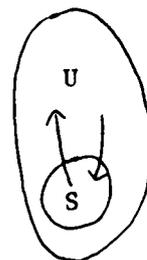


Fig. 3

Dans une 3ème approximation, on tient compte d'une action globale de l'extérieur et d'une réaction du système sur l'extérieur; c'est le cas de l'approximation des théorie de champs, par exemple théorie de Lorentz des électrons. Mais ce procédé ne décrit pas la situation réelle et dans une 4ème approximation l'extérieur non seulement exerce une action sur le système, mais encore sur les

constantes caractéristiques propres du système, tandis que le système réagit sur l'environnement. Ces approximations successives s'accompagnent de complications de plus en plus grandes. Dans chaque cas, il y a lieu d'examiner à quel degré d'approximation il convient de se limiter.



Fig 4

La théorie des systèmes est utilisée de trois façon principales : 1°) par des modèles analytiques, 2°) par des modèles de simulation, 3°) par l'esprit général de la théorie des systèmes.

5. ACTION SUR UN SYSTEME

Pour pouvoir agir sur le système étudié, il faut s'en être fait une représentation de façon à se rendre compte des actions possibles et des résultats qu'elles sont susceptibles d'avoir. Pour réaliser cette représentation, on va essayer d'utiliser des notions mathématiques et c'est ainsi qu'on va, comme je l'ai dit, construire un modèle du système. Ce modèle ne sera pas une représentation exacte du système, mais en sera une représentation simplifiée et schématisée analogue à ce qu'est une carte géographique pour un pays. Il ne faut pas confondre les faits et les mots. On veut parler des faits, on veut les décrire, on veut les prévoir. Pour prévoir, il faut faire des raisonnements, c'est-à-dire faire un discours selon certaines règles. Il existe un domaine et un seul où l'on fait des raisonnements très précis selon des règles strictes et explicitées, c'est celui des mathématiques. C'est pourquoi nous ne pourrions utiliser les mathématiques que si nous pouvons faire correspondre aux faits étudiés des objets mathématiques. Une fois cette correspondance établie dans les deux sens, on pourra utiliser les raisonnement mathématique pour calculer des prévisions, et c'est en ce processus que consiste la modélisation.

C'est dans le domaine de la Physique Mathématique que les processus de modélisation ont été poussés le plus loin, mais ils sont utilisés dans de nombreux domaines scientifiques et avec succès.

Un modèle ne contient pas seulement une représentation schématisée du système étudié, mais aussi une

représentation des connaissances acquises sur lui, des informations qu'on a le concernant. Et tous ces divers éléments qu'on introduit devront être cohérents entre eux.

6. MESURES

D'autre part, si l'on veut atteindre une connaissance positive sur un système, il faut effectuer des mesures sur lui, en prenant le terme "mesure" dans un sens large, désignant aussi bien une mesure avec un appareil qu'une enquête ou un sondage; en résumé, toute méthode de prise de connaissance explicitement formulée. C'est là un point essentiel que von Bertalanffy a laissé de côté.

Les mesures sont à classer en types ou grandeurs. Toute mesure est imprécise. Une mesure implique la mise en interaction pendant un certain temps du système étudié et d'un autre système particulier



Fig. 5

constituant l'appareil de mesure et qui possède un caractère directement observable qui aura changé entre avant et après la mesure. Donc une mesure implique tout un processus avec des dispositifs complexes de transmission de l'information recueillie et de manifestation du résultat obtenu. Ceci introduit des limitations dans la connaissance du système. On peut concevoir des mesures impossibles à effectuer simultanément parce que les deux dispositifs de mesure ne peuvent pas être employés en même temps, comme c'est le cas en physique quantique.

Si toute connaissance positive sur un système s'obtient par des mesures, toute mesure présuppose une conception théorique ou au moins un modèle. Il y a là une situation dialectique. Le modèle contient des constantes, des paramètres, des variables et des relations entre ces quantités. Les mesures vont concerner les quantités du modèle; si le modèle est suffisamment adéquat ces quantités correspondent à des propriétés du système concret. Certaines de ces quantités peuvent être inaccessibles à la mesure, d'autres être mesurables. Certaines mesures peuvent être effectuées simultanément, d'autres pas, comme c'est le cas en physique quantique. Une mesure est

un acte concret qui ne se place pas au niveau du modèle, mais au niveau du système; par contre, son interprétation se place au niveau du modèle.

Une mesure se fait en utilisant une méthode de mesure explicitement formulée, faisant intervenir des éléments concrets qui constituent ce qu'on peut appeler un "système mesureur", et qui à une certaine époque, entre en interaction avec le système étudié. De ce système mesureur, on a constitué aussi un modèle, ainsi qu'un modèle du processus de mesure, cela qu'il s'agisse de mesure physique ou biologique ou économique. Mais tout système n'est pas un système mesureur. Il faut qu'il présente certaines propriétés. Celles-ci ont été formulées par le professeur Gonella de Turin (12) : l'interaction de mesurage, apportant une certaine information sur le paramètre mesuré, et qui est élaboré par les chaînes de transducteurs, appelés appareils mesureurs, jusqu'à fournir un "signal de lecture", reçu par l'observateur, (qui peut être aussi un autre instrument). Le signal de lecture se présente en un format convenable pour la lecture. On le décrit par une "valeur de lecture", exprimée en terme de l'unité de ce format, qui n'a rien à voir avec la grandeur mesurée. Il faut bien distinguer entre la lecture (description du signal mesuré à l'entrée de l'appareil mesureur) et qui s'exprime par un ensemble de nombres lié à l'unité de mesure. C'est la "relation de calibration" de l'instrument qui fournit le lien entre lecture et mesure. Elle doit indiquer en correspondance à chaque valeur de lecture quel ensemble-mesure* il faut assigner au paramètre. La relation de calibration doit être valide pour tout exemplaire d'instruments de mesure construits en série. Sa détermination est donc une affaire de contrôle de qualité.

* Du fait de l'imprécision fondamentale de toute mesure, au lieu de considérer à la manière classique le résultat d'une mesure comme un nombre inconnu contenu dans un intervalle plus ou moins étroit et plus ou moins bien déterminé, il est plus naturel et plus direct de considérer un intervalle à extrémités rationnelles comme constituant le résultat de la mesure; ceci a été montré par Mme Paulette Février (13) dans sa thèse de statistique en 1967. Comme un tel intervalle n'est pas exactement connu, on peut le considérer comme un ensemble flou (J.L. Destouches (14) Gonella (12) Paulette Février (15)).

On doit tenir compte aussi du fait que toute mesure prend un certain temps. On ne pourra donc pas connaître la valeur instantanée de grandeurs variant très rapidement. Ainsi se produisent des limitations de nos connaissances provenant des techniques même de prise de connaissance.

Cependant la mesure est la source de tout savoir objectif sur les systèmes. Mais la mesure, ou plus généralement l'expérience nécessite un cadre préalable pour être formulée; de là des dialectiques système-modèle, système-mesure, théorie-expérience.

7. LOGIQUE DES PROPOSITIONS EXPERIMENTALES

Aux mesures s'associent des énoncés de résultats de mesures. Ceux-ci sont de la forme (13) :

$$\text{Re Mes } A \subseteq I \text{ à } t_0$$

pour une grandeur A , où I est un intervalle à extrémités rationnelles ou plus généralement un pavé à sommets rationnels. Une écriture de cette forme constitue un "énoncé élémentaire". Comme certains résultats de mesures sont répétables, on est conduit à utiliser le connecteur logique "et" pour exprimer une suite finie de résultats de mesures répétés. On est alors conduit à compléter le connecteur "et" par les connecteurs "ou" (faible) et "négation", pour combiner entre eux des énoncés élémentaires de résultats de mesures. En passant à la limite d'une infinité de réunions ou d'insertions d'intervalles ou de pavés rationnels on est conduit à accepter comme ensembles-résultats de mesures possibles les ensembles boréliens. Un énoncé de résultat de mesure sera alors de la forme

$$\text{Re Mes } A \subseteq E \quad \text{où} \quad E \in \mathcal{B}_A$$

en désignant par \mathcal{B}_A les ensembles boréliens de l'espace R_A associé à la grandeur A .

A ces propositions expérimentales on est conduit à associer un connecteur "ou" dit "fort" tel que des énoncés de résultats expérimentaux liés par ce connecteur constituent ce qu'on appelle des "propositionnelles". (13)

Ainsi on constitue une algèbre et on fait apparaître une première structure sur le système étudié.

Mais deux cas sont à distinguer ici :

1er cas : Toutes les paires de grandeurs sont simultanément mesurables. Dans ce cas on peut définir une opération de composition des grandeurs et au moyen de cette opération construire une "grandeur

d'état" telle que de sa connaissance à un instant on peut tirer la valeur de toute grandeur à cet instant. Inversement de tout résultat de mesure à une époque t_1 sur une grandeur on tire une condition imposée à l'état à cet instant t_1 . Dans ce cas la structure des énoncés expérimentaux est celle d'une algèbre de Boole. Dans ces conditions le système peut être représenté par un point mobile dans un espace d'état qui n'est autre que l'espace associé à la grandeur d'état. Dans ce cas, la structure du système est entièrement représentée par la structure de l'espace des états. En général c'est un espace fonctionnel. Dans le second cas il existe au moins une paire de grandeurs non simultanément mesurables. Ce second cas est beaucoup plus intéressant parce que plus difficile à traiter. Il faudrait pour en parler complètement présenter un exposé détaillé de la théorie générale des prévisions, ce qui demanderait beaucoup de temps. Il résulte de l'emploi de cette théorie, dans ce cas, des propriétés particulières pour les propositions expérimentales que je me bornerai à résumer ici : la structure introduite par les propositions expérimentales n'est plus une structure d'algèbre de Boole : trois formulations peuvent être adoptées dans ce cas pour les propositions expérimentales :

- 1°) On peut convenir que des propositions expérimentales de la forme
 $\text{Re Mes } A \subseteq E_A$ $\text{Re Mes } B \subseteq E_B$

ne peuvent être connectées par les connecteurs "et" ou "ou" que si les grandeurs A et B sont simultanément mesurables. Dans ce cas on a des opérations conditionnelles qui ne sont pas applicables à toutes paires d'éléments, ce qui est fort incommode.

2°) Une seconde formulation est celle qui avait été employée par Paulette Février (16) dans ses premiers travaux : on introduit une troisième valeur logique, "absurde"; les connecteurs sont alors applicables à toute paire d'énoncés expérimentaux mais la valeur du résultat dépend du fait que les grandeurs A et B sont simultanément mesurables ou non. On a ainsi une logique qui n'est pas purement formelle, mais c'est la plus forte compatible avec les conditions imposées dues à l'existence de paires de grandeurs non simultanément mesurables.

3°) Une troisième formulation consiste à ne garder que les formules algébriques qui sont toujours valables, que les paires d'énoncés considérés soient composables ou incomposables, c'est-à-dire correspondent à des paires de grandeurs simultanément mesurables ou non simultanément mesurables. De cette façon on perd certaines affirmations par rapport à la seconde formulation mais on gagne en simplicité puisqu'on n'a pas à faire la distinction entre composabilité et

incomposabilité; on revient pour les énoncés expérimentaux à une logique purement formelle.

On constate alors que la structure algébrique que l'on obtient dans cette troisième formulation est toujours un treillis complété. Une telle structure induit sur le système une structure faible : il n'y a pas d'état intrinsèque du système au sens qui apparaissent dans le premier cas. Alors se pose le problème de la représentation du système. Ce second cas doit être divisé en deux sous cas.

1°) à chaque énoncé expérimental on peut faire correspondre un énoncé d'appartenance d'un point X_0 , d'un certain espace Y à un ensemble E d'une famille \mathbf{F} d'ensembles de cet espace Y . Le point X_0 constitue alors une représentation des connaissances acquises sur le système et l'espace Y constitue un espace représentatif. J'avais appelé le point x_0 un "élément initial" (3).

Dans ce cas, si l'on dispose de lois d'évolution, on peut se transposer à une époque future t et faire correspondre à x_0 un point $x(t)$ du même espace Y , appelé "élément de prévision", à partir duquel on calculera des prévisions pour des résultats de mesures à l'époque t si à cette époque t on effectue des mesures, prévisions qui s'exprimeront sous forme de probabilités.

$$\text{Prob} \{ \text{Re Mes } B \subseteq E \text{ à } t \} = F(B, E, X(t))$$

On peut distinguer plusieurs sous-cas plus ou moins particuliers. Dans l'un dit "schéma vectoriel", l'espace Y est un espace vectoriel et la famille \mathbf{F} est une famille de variétés linéaires fermées ou sous-espaces. La mécanique quantique est un cas particulier de schéma vectoriel où l'espace Y est hilbertien. Divers cas plus généraux ont été définis autrefois par Paulette Févier (17) dans son livre sur la structure des théories physiques : schéma vectoriel, schéma fermé, schéma ouvert.

Du point représentatif x_0 , on ne peut pas tirer la valeur d'une grandeur quelconque contrairement au cas où il y a grandeurs d'état; on peut au mieux tirer des lois de probabilités pour diverses grandeurs.

2°) On ne peut pas faire correspondre à un énoncé expérimental un énoncé d'appartenance d'un point d'un espace figuratif à un certain ensemble parce que le treillis des propositions expérimentales n'admet pas ici une interprétation géométrique. Cette fois, le système n'admet pas ce qu'on appelle un schéma. Si la structure des propositions expérimentales pour un système permet de dégager un premier niveau de structure du système, ce niveau ne saurait suffire. Les lois fondamentales, les concepts généraux sur un système ne résultent pas

de connaissances strictement positives données par des mesures. Ce qui intervient, c'est le processus complexe de la "synthèse inductive" (3) dont j'ai parlé. De la synthèse inductive se dégagent diverses structures du système. On peut ensuite les comparer à l'expérience considérée d'une façon globale et vérifier l'adéquation ou l'inadéquation des structures dégagées.

8. LOIS D'EVOLUTION ET STRUCTURES GLOBALES

Les secondes structures qui apparaissent sont relatives aux lois d'évolution. Ces lois peuvent être déterministes ou indéterministes et être plus ou moins incertaines.

Elles sont de formes très variées selon les systèmes étudiés : on rencontre le plus souvent des systèmes d'équations différentielles ou d'équations aux dérivées partielles avec des conditions aux limites, mais aussi des équations intégral-différentielles, des équations intégrales, des équations aux différences finies.

Dans un système sur lequel on peut agir, il faut encore décrire de quelle façon une action est possible. Ceci introduit un nouveau type de structure. Dans le cas le plus simple, cette structure se décrit au moyen d'un espace de commande.

Nous avons vu que dans un système apparaissent des structures globales, indépendantes du détail de sa composition. Une méthode pour les appréhender est de rechercher les transformations qui laissent le système invariant ou bien une partie du système invariant. On peut aussi avoir des systèmes possédant des structures évolutives. On ne doit pas oublier non plus que système et environnement réagissent l'un sur l'autre.

9. SYSTEMES A PLUSIEURS NIVEAUX

J'en arrive enfin aux systèmes à plusieurs niveaux. Plutôt que de chercher à en donner une définition abstraite et générale, je vais citer des exemples. Le premier concerne la théorie cinétique des gaz. On suppose qu'un gaz est représenté par un ensemble de molécules obéissant aux lois de la mécanique classique. Mais ceci ne suffit pas pour définir un gaz. Il faut encore admettre qu'il existe une hypothèse

d'inorganisation moléculaire. Cette hypothèse de caractère global vient se situer à un autre niveau que les lois concernant les molécules. On a ici un système à deux niveaux; l'hypothèse d'inorganisation va permettre de définir une densité dans l'extension en phase individuelle, mais ceci n'est pas compatible avec les lois de la mécanique classique. Comme dans tous les systèmes à plusieurs niveaux, il va falloir faire des arbitrages entre les exigences propres à chaque niveau qui en général ne sont pas compatibles. On adopte l'équation de Boltzmann comme équation d'évolution qui résulte du deuxième niveau, mais pour l'établir, on utilise partiellement les lois de la mécanique; on en prend ce qui est utile en laissant de côté le reste.

Un autre cas est celui où l'on fera une réduction d'un niveau à l'autre de façon à revenir à un système à un seul niveau. Un exemple en est fourni par la mécanique statistique classique. On a un espace d'état constitué par l'extension en phase du système. On a besoin d'une hypothèse globale qui sera l'hypothèse ergodique. Mais nous pouvons ici effectuer une réduction grâce aux théorèmes ergodiques en remplaçant l'hypothèse globale par une hypothèse de structure du système mécanique qui est compatible avec les lois de la mécanique et fournit par les théorèmes ergodiques les conséquences dont on a besoin pour bien avoir un gaz.

Un troisième exemple est fourni par la mécanique statistique quantique de von Neumann. Ici la conciliation des deux niveaux se fait en distinguant les grandeurs macroscopiques des grandeurs microscopiques et les grandeurs de ces deux types sont non simultanément mesurables.

Ce procédé de la non simultanément de mesures de grandeurs appartenant à deux niveaux différents est un procédé de conciliation entre deux niveaux, mais il n'est pas suffisant en général.

Je pourrais citer bien d'autres exemples dans la physique, comme la théorie cinétique des métaux où l'on considère un gaz d'électrons circulant dans un réseau cristallin; on ne sait pas montrer qu'un ensemble d'atomes va s'arranger selon la structure d'un réseau. On a donc là une structure de deuxième niveau pour le gaz d'électrons.

Dans tout système à plusieurs niveaux, il y a des problèmes de conciliation et d'arbitrage. Mais il n'y a pas de méthode générale pour les résoudre. La réduction de deux niveaux à un seul est exceptionnelle, et, en général, des exclusions de mesures simultanées

de deux niveaux ne suffisent pas pour opérer la conciliation et lever les contradictions.

10. SYSTEMES BIOLOGIQUES

J'ai l'impression que si l'on veut essayer de construire des modèles pour des systèmes biologiques, il est nécessaire de considérer des systèmes à plusieurs niveaux. Par exemple, un niveau génétique et un niveau somatique, ou bien au moins trois niveaux : moléculaire, cellulaire, et d'ensemble avec les fonctions. Il est clair qu'on ne peut se limiter au niveau moléculaire car par suite de l'indiscernabilité des atomes de même espace on ne peut dire si un atome appartient ou non à un être vivant contenu dans le système considéré; or il faut bien décrire d'une façon ou d'une autre cet être vivant et ceci exige au moins un autre niveau. Il y a aussi des dispositions autorégulateurs décrits par les procédés de la cybernétique; ils ne s'établissent pas au niveau moléculaire.

Evidemment, les modèles de Prigogine sont tels qu'il part d'un seul niveau et le système est tel qu'il crée par lui-même, par son évolution, un second niveau de structure. Dans ses modèles, il y a donc réduction à un seul niveau. Mais c'est là le cas de systèmes assez exceptionnels. Si l'on tient compte des idées de Schrödinger de Brillouin, d'Elsasser, qui ont insisté sur l'importance de l'ordre en biologie, sur la place de chaque atome dans une macromolécule, sur l'hétérogénéité, toutes ces idées ne peuvent s'exprimer que sur un deuxième niveau différent du niveau de base moléculaire.

Mais peut être qu'avant de pouvoir construire un modèle utile en biologie, il faudrait avoir construit un modèle adéquat d'un liquide et en particulier de l'eau, ce qu'on est loin d'avoir pu réaliser.

Pour aller au delà il faudrait aussi être biologiste.

11. CONCLUSION

Quelles conclusions peut-on tirer de tous ces développements ?

Je voudrais d'abord faire remarquer que l'ambition de se placer au niveau des systèmes, ce qui me paraît indispensable déjà

depuis de nombreuses années, s'accompagne de difficultés considérables lorsqu'il s'agit de les aborder, et a fortiori d'en parler.

En effet, les défauts de mon exposé viennent de ce que chacune des notions auxquelles j'ai du faire appel : système, modèle, mesure, prévision, structure, suppose les autres et entretient avec elles des rapports dialectiques. Or, le discours est linéaire, et ce que l'on gagne en synthèse on le perd en précision. Néanmoins, si l'on n'aperçoit pas la nécessité d'une vue synthétique des problèmes, une fois atteinte la limite des développements analytiques possibles, on se trouve devant un mur.

Il aurait fallu beaucoup plus de temps pour entrer dans les détails techniques à propos de chacun des points que j'ai abordés. En particulier, je pense que j'aurais dû entrer beaucoup plus dans le détail de la théorie générale des prévisions.

Dans presque tous les cas, la résolution des difficultés techniques qui se présentent demanderait un travail considérable et pour chacune une discussion approfondie serait nécessaire. Pour ma part, j'entrerais volontiers dans le détail des problèmes posés par la théorie générale des prévisions où je suis plus spécialement concerné, si quelqu'un parmi vous souhaitait qu'on l'examine maintenant de plus près.

Je vous remercie de votre attention.

BIBLIOGRAPHIE

1. Ludwig Von BERTALANFFY
 - a) Der organismus als physikalisches system betrachtet, Die Naturwiss, 28, (1940a) 521-531.
 - b) The theory of open systems in physics and biology Science, 111, (1950a), 23-29.
 - c) General system theory, (G. Braziller, N.Y., 1968).

2. J.L. DESTOUCHES
Recherches sur les mécaniques ondulatoires et la superquantification en vue d'une mécanique générale (1ère thèse, Doc. es Sc. Physiques, Paris 1933; Ann. de Phys. XIès.t.II, juillet 1934).
3. J.L. DESTOUCHES
Les principes de la mécanique générale (2ème thèse, 1933.(A.S.I (Hermann, 140, 1934).
4. M. FRECHET
Les espaces abstraits, Paris 1928, (Gauthier Villars).
5. J.L. DESTOUCHES
Principes fondamentaux de Physique théorique (3 vol. Hermann, 1942), t.II, p.177.
6. PRIGOGINE
Etude thermodynamique des phénomènes irréversibles, Paris, Dunod, 1947.
7. THOM
La théorie des catastrophes.
8. J.L. DESTOUCHES
Essai sur la forme générale des théories physiques (Thèse de Doct. ès Lettres, Paris 1938).
9. J.L. DESTOUCHES
Cours de la fondation Peccot au Collège de France, 1938, publié dans : Corpuscules et systèmes de corpuscules (Gauthiers-Villars, Paris 1941).
10. J.L. DESTOUCHES
Sistemi et modellazione, La Nuova Critica, Roma, 1973, IV, p.5-28.
Cours de Théorie des Prévisions, Polycopié, U.E.R.50; Univ. Paris VI, 1ère ed. 1972, 4ème ed. 1976, chap.I.

11. J.L. DESTOUCHES
Leçons sur le champ fondamental (Gauthiers-Villars, 1961, p.81-87.
12. GONELLA
Communication Conférence IMEKO, Enschede, Décembre 1975.
Conférence Univ. Paris VI, Mars 1976, à paraître Revue Philosophique.
13. Paulette FEVRIER
Structure des raisonnements expérimentaux et prévisionnels en physique (Thèse 3ème cycle de Mathématiques Statistiques, Paris, 1967).
14. J.L. DESTOUCHES
Communication IMELO, Colloquium, Enschede, Décembre 1975.
15. Paulette FEVRIER
On the representation of the results of measurements by fuzzy sets. Communication Congrès européen de cybernétique, Wien, 1976.
16. Paulette FEVRIER
Les relations d'incertitude et la logique. Comptes-rendu Acad. Sc., 15 février 1937, t.204, p.481-83. C.R.A.S. mars 1937, t.204, p.958-959.
Les relations d'incertitude et la logique (Communication Congrès Descartes (IXè Congrès intern. de Philosophie t.VI, pp.88-94, Act. Scient.I, fasc.535. Hermann, Paris 1937).
17. Paulette FEVRIER
Thèse Université, Paris Sciences, 1945.
La structure des théories physiques (P.U.F.1951).