

R. THOM

D'UN MODÈLE DE LA SCIENCE À UNE SCIENCE DES MODÈLES

Des deux concepts de Science et de Modèle, on pourrait penser que le second est étroitement subordonné au premier: le modèle, serait-il autre chose que cet algorithme ancillaire dont va se servir la science pour édifier ses théories? En fait, il en va probablement du contraire. Alors que la science n'est qu'une activité toute récente dans l'histoire de l'humanité, l'usage de modèles semble remonter au passé le plus lointain de la préhistoire, apparaître à la source même de toute vie psychique, plonger ses racines aux tréfonds de l'organisation biologique elle-même....

1. UN MODÈLE (PHYLOGÉNÉTIQUE) DE LA SCIENCE

Si, en effet, on veut bien admettre que la distinction: Sujet-Objet trouve sa plus primitive réalisation dans l'opposition biologique Prédateur-Proie, on voit immédiatement où réside la différence essentielle entre Sujet et Objet: le sujet est capable de simuler l'objet, d'en reconnaître la forme extérieure et d'en prévoir le comportement, alors que l'objet est – en général – incapable de 'simuler' intérieurement le sujet. Du fait que le sujet possède un modèle intérieur de la forme de l'objet et de son comportement, la lutte entre sujet et objet se termine, quasi-inéluctablement, par la victoire du sujet: la proie finit par être capturée par le prédateur. Ce processus de capture a lieu conformément à un schéma inné, intérieur au sujet lui-même, dont la réalisation externe peut cependant se trouver affectée par les réflexes de défense de la proie, à qui est laissée une certaine initiative. (Qu'on songe au chat qui 'joue' avec la souris.) Nous touchons ici, semble-t-il, à la source même de la subjectivité: la conscience ne naît que comme conscience de quelque chose, manifestation d'un projet du sujet à l'égard d'un objet. Or, la réalisation de ce projet exige une certaine stabilité des conditions extérieures, elle exige que certaines conditions initiales, présentes au début de l'action, en permettent le déclenchement. Si ces conditions ne sont pas réalisées, ou ne le sont qu'incomplètement, il s'ensuit pour le sujet un état de malaise: il s'agit de maintenir la perma-

nence de son moi-même en l'absence d'objet, ou encore en présence d'une pluralité d'objets possibles entre lesquels il faut choisir (comme l'âne de Buridan à égale distance entre ses deux bottes de foin). Dans ces situations ambiguës, où l'esprit sent qu'il y a quelque chose à faire, mais ne sait que faire, la levée de l'indétermination, même par un procédé artificiel, est un soulagement, car c'est le passage d'une conscience obscure et déchirée, à une conscience pleine et entière, toute entière absorbée dans la réalisation de l'acte. Cette répugnance intrinsèque de l'esprit à concevoir le hasard, l'indétermination, trouve son expression quantitative dans la fonction d'utilité de Von Neumann-Morgenstern: si l'on vous offre de choisir entre deux alternatives: ou recevoir un million de francs immédiatement, ou recevoir demain, soit deux millions avec probabilité un demi, ou rien (également avec probabilité $\frac{1}{2}$), qui ne choisirait de recevoir immédiatement la première somme?

Qu'on ne s'y trompe cependant pas: ces situations ambiguës sont relativement exceptionnelles. Comme tout animal, l'homme dispose génétiquement d'un stock de 'programmes' qui lui permettent d'agir avec efficacité dans son environnement. Il n'a procédé à une 'modélisation' artificielle que lorsque la modélisation naturelle, fournie par son patrimoine biologique, venait à faire défaut. Ce sont donc les faits 'non programmés' par la régulation biologique, qui, les premiers, ont nécessité la recherche d'une explication. Parmi ceux-ci, la maladie et la mort viennent en première place. Frappé par la maladie ou la mort d'un proche, l'on ira consulter un devin – shaman, guérisseur ou sorcier – qui proposera une explication. Très fréquemment le devin utilise un 'simulateur' naturel des difficultés du consultant (Ainsi le devin dogon, qui, selon M. Griaule, utilise les traces nocturnes d'un chacal sur une plage sableuse rectangulaire...). Les explications proposées sont les seules que permettent à l'époque les conceptions générales: la maladie ou la mort sont l'effet d'un 'sort' jeté soit par un membre de la communauté, soit par une entité surnaturelle (revenant, ou démon). C'est la structure même du langage (essentiellement causative) qui impose cette interprétation. L'acte de divination permet alors de préciser la source de l'influence maléfique. L'action magique elle-même, comme l'envoûtement, fait souvent appel à un simulacre de la personne envoûtée. Agir sur le simulacre, c'est aussi, par action sympathique, agir sur la personne. Le 'modèle' dont il est fait usage est en quelque sorte consubstantiel à l'être modélisé.

Un tel mode de penser (et d'agir) peut surprendre notre mentalité 'moderne'. Sans vouloir discuter ici d'un problème fascinant, disons d'emblée que le seul critère d'efficacité ne révélera pas immédiatement l'inanité de ces procédures. En effet, dans une situation très indéterminée, il est très fréquent que le 'choix au hasard' soit la meilleure stratégie offerte à un joueur. Mais l'esprit répugne – on l'a vu plus haut – à prendre une décision complètement arbitraire, et il préférera toujours à cet arbitraire la soumission à un modèle, si faiblement motivé qu'il puisse apparaître. Ainsi un joueur à la Loterie, ayant à choisir un numéro dans une liasse de billets, préférera tirer aux dés le chiffre élu. D'autant plus que ce choix libère l'esprit du fardeau de l'hésitation en lui proposant une tâche bien définie. Faire légitimer un tel choix par l'appareil socialement reconnu d'un devin (ou, dans les temps modernes, la compétence scientifique d'un spécialiste) est source – psychologiquement – d'une incontestable assurance, qui peut avoir le plus heureux effet sur la manière (et le succès) avec lesquels l'individu va affronter l'épreuve.

Nous avons évoqué tout à l'heure le langage; dans un groupe social, le langage fonctionne comme un relai sensoriel: par la parole, un individu *A* peut raconter à un individu *B* ce que lui, *A*, peut voir, et que *B* ne peut pas voir. Par la constitution, dans les psychismes de *A* et *B*, d'univers sémantiques sensiblement isomorphes, le langage permet une possibilité étendue de simulation des phénomènes physiques et sociaux. Mais, pour être décrits verbalement, ces phénomènes devront nécessairement se couler dans le moule tout préparé des structures syntaxiques. C'est donc que ces structures syntaxiques sont spécialement adaptées aux interactions les plus usuelles entre êtres animés et inanimés. Or, parmi les catégories grammaticales observées dans les langues naturelles, la distinction Nom (Substantif) – Verbe semble l'une des plus universelles. Or, il est frappant que le concept de 'modèle' semble (dans son acception moderne) échapper à cette distinction: on peut modéliser un être, comme on peut modéliser une action. Il n'est peut-être pas déraisonnable de penser que la même ambiguïté sémantique a pu affecter ces entités surnaturelles dont le primitif peuplait son univers, et auxquelles il attribuait la responsabilité des phénomènes. Ambiguïté qu'on retrouve jusque dans le Panthéon de l'antiquité classique: Jupiter tonnant. La même dichotomie: Substantif – Verbe se retrouve dans l'opposition: Objet – Instrument. De l'objet, réalisé dans la proie, on attend une certaine autonomie, voire

une 'conscience' analogue à celle du sujet (Cf. les modèles de [1], où sujet et objet s'identifient); au contraire de l'instrument, on n'attend qu'une passivité totale, une inertie complète qui n'en fait qu'un esclave aveugle et efficient dans le déroulement d'une action organique préétablie [2]. Chez l'instrument, comme chez toute machine, une initiative propre ne peut être que source de panne ou d'échec: on ne saurait donc la tolérer. La fabrication d'un outil est donc le premier exemple d'un processus mental de modélisation dont le résultat matériel, l'instrument, est un corps solide dont la forme a été dictée par des exigences dynamiques, celles de l'action de l'instrument sur son objet. En ce sens, l'outil n'est guère qu'un verbe solidifié. Placé devant ces Dieux-Démons surnaturels, mi-substantifs, mi-verbes, l'esprit a cherché à agir sur eux en les modélisant, comme le prédateur a un modèle de ses proies; mais cette modélisation s'est faite selon deux directions opposées: soit dans la direction l'objet (puis du sujet) soit au contraire dans la direction du verbe (de l'instrument). Le premier type de modélisation a conduit à la pensée religieuse: l'homme a traité ses Dieux comme il aurait traité un personnage plus puissant de son groupe social: d'emblée, il renonce à la violence, et cherche à fléchir le Dieu par la prière, le don, le sacrifice; dans le second type de modélisation, l'homme, au contraire, réduit les entités sarnaturelles à de purs instruments: il en fait des 'actions pures' qu'il saura déclencher par la vertu analogique de simulacres, ou de formules verbales. La vision magique du monde est celle d'un univers de puissances qui, virtuelles, ne tendent qu'à devenir actuelles. Il suffit pour cela de les libérer en prononçant la formule appropriée, en créant par un rite analogique un germe de formes qui va localiser la puissance évoquée à l'endroit voulu, sur l'objet désiré. En ce sens, la magie, par l'attitude psychologique qu'elle suppose chez l'homme – qui fait violence aux Dieux – *Vim facture deis* (Lucain) – est bien l'ancêtre de la science moderne (plus particulièrement de la physique, qui a su se rendre maîtresse des formes les plus dociles de l'énergie). Dans la mesure où les actions ont des 'formes' typiques (je dirais plus volontiers, archétypales), cette vision n'est pas dépourvue de fondement; son tort unique est de privilégier l'identité de formes en oubliant la disparité des substrats sur lesquels ces formes sont définies. C'est qu'il est en effet beaucoup plus facile de modéliser par analogie des formes (la forme est dynamiquement contagieuse) que les substrats qui les portent: le substrat le plus général, l'espace-temps, n'a été correctement modélisé dans son intégralité

qu'après l'apparition de la Géométrie et le la Dynamique... D'ailleurs, en un certain sens, modéliser un système, n'est-ce pas d'abord oublier son substrat, à savoir sa localisation spatio-temporelle? Si l'on n'acceptait pas de déprécier cette localisation, un être ne pourrait avoir d'autre modèle que lui-même (conformément au principe des indiscernables de Leibniz), et toute modélisation deviendrait impossible.

Il est vraisemblable que, cependant, la science n'est pas issue directement de la volonté dominatrice de l'homme de s'asservir les phénomènes. L'organogenèse biologique, puis, chez l'Homo Faber, la fabrication des outils, reposaient sur une modélisation implicite qui n'avait aucune raison d'accéder à la conscience claire. Plus vraisemblablement, la science est née des techniques de divination. Une attitude spéculative, comme l'exige la science, demandait en effet un certain détachement vis-à-vis de la volonté d'agir; l'interrogation divinatoire est, typiquement, une volonté d'interprétation d'une morphologie issue d'un processus aléatoire. Or on ne peut jamais simuler complètement le hasard (cela résulte, en fait, de la seule définition possible du hasard: un événement strictement aléatoire est un processus dont l'évolution ne peut être simulée par aucun mécanisme). Dans tout système naturel utilisé à des fins divinatoires, il y a donc une part de déterminisme qu'il convient de bien connaître: soit pour en écarter l'effet dans l'interprétation finale, soit au contraire, dans le cas d'un devin tricheur, pour exploiter ce déterminisme afin d'imposer au consultant une solution désirée. Ainsi dans le cas du mouvement des corps célestes, l'astrologie a donné naissance à l'astronomie: un discours a fait place à des lois. Il est typique que, pour aboutir à une connaissance explicite du mouvement des corps solides, dont l'Homo Faber avait une connaissance implicite très raffinée, il ait fallu passer par le détour du mouvement des corps célestes. Sans doute fallait-il que d'abord l'interrogation prime l'action. Plus tard, le développement des mécaniques galiléennes et newtonienne n'a fait qu'amener à la conscience les mécanismes inconscients de la simulation biologique nécessaire au contrôle moteur de nos mouvements.

En résumé, trois verbes résument l'attitude de l'homme en face de l'inconnu qui l'entoure: implorer, interroger, commander. Le premier verbe est spécifique de l'attitude religieuse, qui, de ce point de vue, est réellement antinomique de l'attitude magique, puis scientifique. Elle présup-

pose d'emblée, que, des Dieux, il n'y a rien à connaître, et que c'est seulement en les implorant, en se les conciliant par la prière ou le don, qu'on peut les rendre favorables à nos desseins. Il n'est que juste, toutefois, de reconnaître qu'il y a eu, en religion, des mythes qui ont exprimé la nostalgie impérialiste de l'homme en face de l'univers (le combat avec l'ange, Prométhée...), de même qu'il y a eu, jusqu'à une date relativement récente, des oracles qui répondaient aux interrogations humaines. La magie, elle, a connu simultanément les deux modes de l'interrogation et de l'action. La science est alors née du besoin de perfectionner les techniques d'interrogation, ce qui, ultérieurement, avec la découverte des grandes lois physiques, a conduit à une extension considérable de nos possibilités d'action. Comme on l'a vu plus haut, pour interroger, on 'modélise' la situation par un système matériel (ou plus tard, conceptuel) approprié. Il est frappant de constater que les deux grands types de modèles rencontrés en Science actuelle: Modèles qualitatifs et Modèles quantitatifs répondent grosso modo aux deux modes fondamentaux de l'interrogation et de l'action. De ce point de vue, également, on pourrait trouver dans la magie l'ancêtre du point de vue quantitatif de la science moderne, et ici, non seulement par l'usage de concepts abstraits tels que *mana*, *orenda*... etc. en qui Durkheim voulait voir l'origine des concepts modernes de force ou d'énergie. Mais aussi par le fait qu'une action magique n'est jamais conçue comme douée d'un caractère inéluctable, comme l'effet d'une loi physique: à une influence magique, on peut en opposer une autre dans un conflit au résultat incertain; et le seul modèle analogique d'un tel conflit est celui de deux individus qui luttent physiquement: c'est le plus fort qui l'emporte au sens quantitatif. A cela s'ajoute la raison plus cachée que, pour définir un 'modèle', une 'copie', il est nécessaire d'avoir une géométrie de transformations spatiales qui permettent de comparer l'image et son modèle; où trouver ce groupe sinon dans le groupe des déplacements euclidiens, dont la nature continue, quantitative (un groupe de Lie) contient implicitement toute la mécanique et la physique classiques? Le caractère analogique de l'action magique repose donc en définitive sur l'existence de ce groupe considéré globalement, bien que l'effet de l'action magique puisse conduire à une déformation globale de l'espace (ou, tout au moins, être interprétée comme telle, en particulier, dans les faits de 'participation' au sens de Lévy-Bruhl).

2. VERS UNE SCIENCE DES MODÈLES

La science se distingue de la magie par un point essentiel: la magie se propose de résoudre des problèmes individuels (ou, à tout le moins, locaux, comme dans le cas d'un faiseur de pluies), alors que la science répond à des questions ayant un intérêt universel dans l'espace et le temps. A partir du moment où le devin a examiné ses systèmes simulateurs en essayant d'y déceler les déterminismes sous-jacents, il a substitué à l'interrogation proprement divinatoire (qui devait répondre à une question personnelle du consultant) une interrogation à caractère indépendant du consultant, scientifique, si l'on ose avancer cette anticipation en pareil cas. Ceci ne devenait possible que la substitution au système modélisant matériel d'une simulation proprement mentale, conceptuelle (ce qu'on appelle usuellement l'intelligibilité). Il devenait alors possible de créer un pont entre cette simulation conceptuelle et la simulation implicite sous-jacente à nos activités sensori-motrices. Ainsi sont nés les grands modèles quantitatifs liés aux lois physiques; les modèles qualitatifs, eux, (essentiellement ceux de la Chimie, de la Linguistique, de l'Anthropologie structurale) sont apparemment plus récents; mais il faut tenir compte du fait que le discours scientifique contient toujours une part écrite en langue naturelle, et qu'en conséquence, toute la modélisation implicite au fonctionnement du langage (la structure de l'univers sémantique) ne peut être dissociée du contenu de la science; or une telle modélisation, qui ne fait appel à aucun calcul, mais à la déduction de nature logique (en un sens vague!) est fondamentalement de nature qualitative. En sorte que les exemples connus de modèles qualitatifs en science sont ceux qui ne peuvent être directement verbalisés (en particulier ceux de la linguistique, qui cherchent à briser la clôture de l'univers sémantique). Faute d'avoir aperçu ce point, la plupart des scientifiques (et même des épistémologues) restreignent le concept de modèle à celui de modèle quantitatif, et beaucoup hésitent à donner un statut proprement scientifique aux modèles qualitatifs. Tel est le point que nous allons discuter.

2.1. *Les modèles quantitatifs*

Les modèles quantitatifs, avons-nous dit, sont étroitement liés à l'utilité pragmatique. En effet, ils s'introduisent dans la situation suivante: il

s'agit d'une opération verbalement bien définie (par exemple: atteindre telle proie avec tel projectile), mais qui peut facilement échouer par suite de légères inexactitudes dans la préparation de l'action. En pareil cas, le succès (ou l'échec) dépend de la valeur de certains paramètres quantitatifs, (par exemple: vitesse et direction du projectile) par rapport à certains seuils qu'il s'agit de préciser. De tels modèles ne peuvent être établis que grâce à l'emploi de lois physiques précises (comme les lois de la Mécanique, dans l'exemple ci-dessus). En ce sens, les lois physiques ne sont pas des modèles, ce sont des *générateurs de modèles*.

À côté de ces modèles déductivement bien établis, parce que la nature des phénomènes constitutifs est transparente, il existe quantité d'autres situations où le modélisme quantitatif s'impose en raison de la nature mesurable des paramètres qui caractérisent l'état du système étudié. Tout ensemble d'expériences faites sur le système, qui consistent à mesurer q paramètres caractéristiques, va donner un point de l'espace euclidien R^q à q dimensions. Répétant ces expériences, en faisant varier les conditions initiales, on va obtenir un nuage de points dans l'espace R^q ; mais cette fois, notre système est une 'boîte noire', dont les mécanismes internes sont mal connus ou inconnus. Dans beaucoup de cas, le nuage de points est concentré autour d'une sous-variété de l'espace, définie par un système d'équations de la forme

$$y_i = f_i(x_j).$$

En de telles circonstances, on peut chercher à donner pour les fonctions f_i des expressions explicites. Les théorèmes standards d'approximation, comme le théorème de Weierstrass, permettent de donner pour les f_i des polynômes $P_i(x) = \sum a_\omega x_\omega$, contenant outre les variables x_i des coefficients indéterminés a_ω . On obtiendra un accord d'autant meilleur avec les données expérimentales qu'on prendra des polynômes de degré plus élevé, contenant plus de coefficients a_ω à déterminer. Il est clair, dès lors que cette procédure est sans intérêt intrinsèque: elle permet tout au plus une interpolation (et une extrapolation limitée) des données empiriques; mais elle ne nous apprend rien sur la nature des mécanismes sous-jacents intérieurs au système; seule une hypothèse sur la nature de ces mécanismes, impliquant des lois physiques explicites, conduira à une expression des fonctions f_i ne comportant qu'un petit nombre de paramètres à déterminer, pourra être comparée à l'expérience, et en cas de bon accord,

on pourra en conclure des indications sur la nature de ces mécanismes. Le grand succès pragmatique qu'ont permis les lois physiques ne doit cependant pas nous dissimuler leurs limites d'applicabilité. Elles sont toujours liées, en fin de compte, à des règles d'invariance régissant la géométrie de l'espace-temps, et ne concernent que des êtres de raison (point matériel, charge électrique... etc.) rarement rencontrés à l'état pur dans les systèmes concrets. Dès qu'on a affaire à des systèmes inhomogènes comportant un grand nombre de particules, on rencontre des difficultés que l'approche statistique ne permet pas toujours de lever (par exemple, la théorie des changements de phase est encore dans un état infantile). Un des grands vices de la production scientifique des temps récents a été l'application routinière des schémas quantitatifs classiques (en particulier, l'usage des algorithmes statistiques) dans des situations qui n'en permettaient pas un usage significatif. Il faut en effet se convaincre d'un point: là où la théorie existante ne permet pas l'application certaine de lois physiques pour décrire la totalité de la structure du processus considéré, l'emploi de considérations qualitatives (du type de celles employées en interrogation divinatoire, une 'herméneutique') est indispensable.

On pourrait en effet définir la 'statistique généralisée' comme l'étude du problème suivant: étant donné un nuage de points dans un espace euclidien R^q , quel est le mécanisme dynamique le plus probable (conceptuellement, le plus simple) qui puisse l'engendrer? On peut en effet penser que tout processus aléatoire peut être considéré comme la projection d'un système déterministe obtenu en introduisant, au-dessus de l'espace des observables R^q , un espace fibré produit $R^q \times F$, où F est la fibre, espace des paramètres 'cachés'. Pour résoudre un tel problème, l'étude grossière, qualitative, de la *forme* du nuage de points à interpréter est un préliminaire indispensable. Or, si la dimension q de l'espace des observables est plus grande que 2 ou 3, si les données expérimentales sont fournies (par exemple, par ordinateur) sous forme de tableaux de nombres, il sera très difficile de visualiser le nuage, et certains de ses traits morphologiques, évidents à la vision géométrique, pourront parfaitement échapper à une manipulation statistique aveugle.

Lorsque les scientifiques à tendance positiviste privilégient les modèles quantitatifs, au point de faire de l'emploi du calcul numérique le critère même de la 'scientificité', on peut craindre qu'ils n'aient jamais pris con-

science des difficultés précédentes. Ils se placent d'emblée dans cette situation 'impérialiste', où l'homme domine complètement le système étudié: un point matériel est entièrement défini par sa masse et sa quantité de mouvement, quantités scalaire et vectorielle de dimension finie. La seule 'initiative' laissée à la matière, c'est son inertie. C'est le triomphe d'une conception purement instrumentale de l'univers. Dès que notre connaissance du système étudié n'est pas totale, on doit nécessairement réserver à l'inconnu, à l'incontrôlable une certaine place. Mais alors on peut toujours interpréter cette situation dans une optique de théorie des jeux: on suppose que notre ignorance provient de l'action d'un démon malveillant, dont on va s'efforcer de percer les habitudes et les limites. Les algorithmes statistiques classiques, fondés sur l'usage de mesures typiques (mesures de Gauss, de Poisson... etc.) correspondent à des démons à l'intelligence rudimentaire, qu'il est relativement aisé de dominer. L'introduction d'un espace F de paramètres cachés est aussi une manière de laisser de la place au démon, mais cette fois, on permet au démon une 'vision', une 'intentionnalité' plus étendue. La classification des types de 'démons' exige alors nécessairement des considérations qualitatives. C'est dire qu'une théorie des modèles quantitatifs dès qu'on sort des systèmes parfaitement connus, et suffisamment simples pour être calculés, conduit nécessairement à l'usage de modèles qualitatifs. Parmi ces théories 'herméneutiques', la théorie des catastrophes est peut-être celle qui offre 'a priori' le champ d'interprétation le plus vaste. Sous sa forme élémentaire, elle vise à expliquer une morphologie par l'action de 'démons locaux' dotés d'une intentionnalité simple (qui s'exprime mathématiquement par un principe d'optimalité). Une telle théorie, en principe, n'attache pas d'importance à l'accord quantitatif; il y a cependant parfois des circonstances irritantes où le modèle qualitatif peut entrer en conflit avec des propriétés métriques locales. Tel est le cas de la théorie du point critique dans la transition Liquide-Gaz: le modèle qualitatif évident, celui de Van der Waals, conduit à une isotherme critique dont l'équation locale est $p-p_c = A(T-T_c)^3$ alors que l'expérience donne une équation de la forme $p-p_c = B(T-T_c)^4$,⁵ Cette énigme, à ma connaissance, n'est pas résolue.

En conclusion, on retiendra de ce paragraphe le fait que, même pour les modèles quantitatifs, la situation est loin d'être aussi claire que les tenants de l'empiricisme positiviste se plaisent à l'imaginer. L'accord quantitatif d'un modèle avec l'expérience à l'imaginer. L'accord quanti-

tatif d'un modèle avec l'expérience a finalement moins d'importance et de signification que sa portée ontologique, ce que le modèle nous permet de conclure quant aux mécanismes sous-jacents aux phénomènes, et dont il se déduit. En pareil cas, c'est l'économie formelle de l'expression, et son adaptation aux résultats (le '*fit*', comme disent les techniciens) qui font autorité en dernier ressort. Si dès lors, les considérations qualitatives sont indispensables, il reste dès lors à préciser ce que peuvent être des modèles qualitatifs, et quel peut être leur rôle.

2.2. *Modèles qualitatifs*

L'histoire des sciences au cours de ce siècle semble montrer que le paradigme des lois physiques, universellement valables et d'une extrême précision, n'a pas progressé depuis les grandes lois de la physique classique du 19^e Siècle (Maxwell). La Mécanique Quantique manifeste plutôt la régularité intrinsèque avec laquelle le cadre conceptuel de l'espace-temps s'évanouit dans l'infiniment petit. Si ce jugement pessimiste est valide, on sera amené à penser que notre époque pourrait bien voir un retour de l'activité scientifique vers des problèmes à caractère individuel, ou local, à la manière de la pensée magique des 'primitifs'. De ce point de vue, on est frappé du caractère fragmentaire, 'bricolé', des techniques qui visent à préciser une décision dans une situation de conflit: recherche opérationnelle, théorie des jeux, jeux différentiels, autant de branches des mathématiques qui révèlent un état d'immaturité très prononcé. C'est peut-être que, là aussi, la nécessité d'agir ne nous a pas laissé le temps d'interroger. Dans tous ces cas, le problème n'est jamais entièrement osé en termes mathématiques; il y reste toujours une part irréductible-formulée en langage usuelle – qui reflète une subjectivité, un anthropocentrisme adhérent à la question elle-même. Et cette situation se révèle souvent par des discontinuités dans les stratégies, une 'morphologie' liée au problème, et qui se manifeste dans ses solutions. C'est dire qu'il y aurait intérêt à replacer ces problèmes dans une optique 'divinatoire', comme d'ailleurs tous les problèmes posés par l'interprétation d'une morphologie expérimentale. La science moderne, c'est bien connu, souffre d'une inflation expérimentale. Rien de plus facile que d'amasser des faits, dès qu'on dispose des instruments et des techniques d'observation appropriés. Mais alors se pose – avec d'autant plus d'acuité – le problème de déceler dans cette masse de faits le phénomène surprenant ou signi-

ficatif. C'est à dire qu'ici encore, la science aura à traiter d'un problème local, parcellaire auquel elle aura à donner une réponse de caractère divinatoire. De ce point de vue, la notion de modèle qualitatif pourrait bien jouer un rôle essentiel.

Grosso modo, on peut dire que donner d'un contenu expérimental un modèle qualitatif, c'est lui faire correspondre une 'Gestalt', une configuration géométrique ou algébrique globale. On doit alors, évidemment, préciser l'interprétation, dans la morphologie empirique, des divers éléments du modèle abstrait qui lui a été associé. On peut distinguer deux types de modèles :

(a) des modèles 'clos sur eux-mêmes' : associés à une Gestalt donnée une fois pour toutes, ils ne sont pas susceptibles d'extension.

(b) des modèles 'génératifs' : là les 'Gestalten' utilisées engendrent une combinatoire, une algèbre, qui permet de 'générer' de nouvelles formes à partir d'un système fini de formes prises comme axiomes. C'est la situation de la logique formelle, et de la grammaire générative.

Il est clair que la validité scientifique d'un modèle qualitatif dépend avant tout de la nature mathématique de la Gestalt utilisée. Si cette dernière est très complexe, sans principe générateur, on pourra reconnaître au schéma une certaine valeur classificatoire, sans plus (Telle est peut-être la situation de la taxonomie botanique linnéenne ou post-linnéenne); de ce point de vue, la théorie des modèles qualitatifs est à créer, car la Gestalt-theorie, issue des théories de la perception, n'est pas une théorie déductive, et n'a jamais été capable de préciser d'où provenait la 'prégnance' d'une forme. Il n'y a guère que la théorie des catastrophes élémentaires qui ait pu classer les formes issues de conflits locaux sur l'espace euclidien. Ce faisant, elle ne fournit que des formes closes sur elles-mêmes, et non une théorie générative. Enfin, cette théorie est trop récente pour qu'on puisse apprécier actuellement sa validité empirique.

Faute d'un fondement théorique assuré, les modèles qualitatifs ont-ils à tout le moins une efficacité pragmatique, un pouvoir prédictif? Si oui, ce ne peut être, essentiellement, que par complétion d'une Gestalt. Cette complétion peut s'entendre de deux manières différentes :

(a) Une case vide du schéma se trouve remplie par extension du corpus expérimental. C'est le cas, par exemple, des éléments transuraniens dans la classification des éléments chimiques de Mendeleev.

(b) Dans le cas de modèles génératifs, une forme nouvelle engendrée

par l'algèbre des formes données est reconnue expérimentalement. (Ainsi, en grammaire générative, on peut 'fabriquer' des phrases correctes, susceptibles d'être rencontrées dans un corpus).

(c) S'il s'agit d'une Gestalt étendue dans le temps, G , il se peut qu'à un instant t_1 donné, la morphologie spatio-temporelle observée puisse être identifiée à une certaine troncation temporelle G_1 de G . On peut alors prévoir que la Gestalt globale G va se réaliser dans un laps de temps ultérieur à $t \rightarrow t_1$.

Une attitude strictement positiviste (ou Poppérienne) conduirait à ne considérer comme scientifiques que des modèles qualitatifs ayant des capacités prédictives (ou susceptibles d'être 'falsifiés'). Ce serait là, à mon sens, restreindre considérablement l'applicabilité de ces modèles :

(a') Même si le schéma proposé comporte des cases vides, rien n'assure que l'expérience pourra les remplir toutes (ni même qu'on pourra découvrir des éléments qui pourraient falsifier le schéma, en refusant de se loger dans aucune des cases).

(b') Pour les modèles génératifs, il est très fréquent que le pouvoir générateur du schéma excède la donnée empirique (Cf. la 'performance', qui limite la 'compétence', en terminologie chomskyste). Ceci n'est pas une raison pour rejeter le schéma.

(c') Pour les Gestalten étendues dans le temps, l'opération de complétion peut n'être pas univoque, en raison de la multiplicité des Gestalten possibles. Souvent on ne peut offrir que des présomptions et non des certitudes. Par exemple, après une morphologie de don symbolisée par le graphe $\sum$, on pourra s'attendre à avoir la morphologie d' 'échange' : ∇ , où le récepteur répond par un cadeau d'échange au don qui lui a été offert en premier. Mais on peut avoir aussi la morphologie de 'double don', répétition du don : $\coprod$. Mais cette dernière morphologie est beaucoup plus rare que l'échange, elle présuppose entre donateur et récepteur une dissymétrie plus forte.

(d') Enfin, très fréquemment, une forme close sur elle-même ne permet aucune prédiction. Il y a certes accord avec l'expérience, mais la chose n'est pas surprenante, puisque le modèle a été bâti *ad hoc*. En conclura-t-on qu'il s'agit là d'un jeu académique sans portée scientifique? On aurait tort, je crois, d'aller jusque-là.

En réalité, le rôle des modèles qualitatifs est essentiel dans l'explication scientifique. Si l'on admet, comme je l'ai proposé que l'explication

scientifique, c'est la *réduction de l'arbitraire* dans la description d'un donné empirique, alors un modèle qualitatif, s'il est intrinsèquement, c'est-à-dire mathématiquement, fondé, répondra précisément à ce but. Une théorie des modèles (comme l'est la théorie des catastrophes) sera un générateur de modèles qualitatifs, tout comme une loi physique est génératrice de modèles quantitatifs. C'est dire que, en l'état présent des choses, une théorie des modèles qualitatifs a assez peu d'intérêt pour la discipline même où elle s'applique (surtout au point de vue pragmatique et expérimental). Par contre de telles applications sont très importantes pour la théorie des modèles, des 'Gestalten', car elles nous proposent des exemples, lesquels, de la Chimie à l'Anthropologie, en passant par la Linguistique, ne sont pas encore très nombreux. Il ne fait aucun doute qu'une telle théorie générale des 'Gestalten', une 'Morphologie Générale', ne serait d'un intérêt épistémologique fondamental. On a objecté à la définition de l'explication scientifique comme réduction de l'arbitraire son caractère subjectif, la notion d'"arbitraire" ne pouvant être intrinsèquement définie: les explications magiques, ou mystiques, ont un pouvoir explicatif certain, bien que non scientifiques. Cette objection est certes valable, mais elle vaut aussi contre l'emploi du langage usuel, de la pensée conceptuelle dans les sciences. La réponse, me semble-t-il, est la suivante: la théorisation scientifique, dans la mesure où elle réduit l'arbitraire dans la description des formes, le fait toujours grâce à l'emploi d'une combinatoire canoniquement définie, en principe formalisable; autrement dit, la démarche théorique dans les sciences, pour avoir force démonstrative, est nécessairement une démarche *locale*, analysable en situations isolées dont chacune a force apodictique. Pour obtenir un consensus, la démonstration scientifique doit nécessairement 'viser bas', de manière à convaincre les cerveaux les plus lents. Les théorisations conceptuelles, rencontrées dans des disciplines réputées exactes (comme la Biologie) font au contraire appel à des concepts tels que: ordre, désordre, vie, hasard, structure, information, sens, message... etc. dont le caractère essentiel est d'être non-local, 'transspatial' (selon la terminologie de R. Ruyer): tous ces concepts impliquent des contraintes à longue portée à la morphologie à laquelle ils s'appliquent. En ce sens, ils jouent un rôle analogue à la 'volonté divine' d'une explication mystique. C'est dire qu'à mes yeux, la théorisation scientifique -en toute discipline, passe nécessairement par l'élimination des concepts, et leur remplace-

ment par des constructions combinatoires sur des formes. C'est l'extension aux sciences naturelles du programme hilbertien de l'élimination de l'intuition dans l'axiomatique de la Géométrie.

Pour remplir un tel programme, une théorie des 'Gestalten' est nécessaire, et elle doit être assez souple pour rendre compte formellement des possibilités déductives du langage usuel. Elle devra donc simuler, fournir un modèle, de l'univers sémantique de nos langages. Nous voici reconduits au rêve de la Caractéristique Universelle de Leibniz (avec cette restriction que le calcul sur les formes pourrait être une opération plus souple qu'un simple calcul algébrique...). La théorie des catastrophes, dans la mesure où elle fournit une théorie de l'analogie, est sans doute un premier pas dans cette voie. Ce n'est pas un hasard si cette théorie est fondée mathématiquement sur la notion de singularité: une singularité, en effet, concentre en un point une structure globale, en sorte que cette notion est l'outil idéal pour l'extension du local au global. C'est par ce biais, très naturel, que s'introduit l'algèbre dans la théorisation; l'algèbre s'introduit également par une autre voie, à savoir, le pouvoir générateur des opérations, l'itération indéfinie d'un calcul. Dans cette dernière manière de voir, il y a une certaine résurgence de l'idée vitaliste d'un sujet capable de répéter indéfiniment le même acte sans en être affecté. Ainsi, l'appel au calcul, supposé éliminer tout anthropomorphisme, recèle en fait une subtile référence à la permanence d'un sujet agissant, dont *a priori* il n'existe aucun équivalent dans les dynamiques naturelles. En plaquant ainsi sur le monde l'infini mathématique, l'homme ne fait-il pas preuve de la même présomption inconsciente que le magicien primitif qui commandait aux Dieux...?

Dans une telle optique de l'explication scientifique, il n'existerait pas d'autre théorisation que mathématique; les concepts utilisés dans chaque discipline, non susceptibles de recueillir un consensus pour leur emploi (qu'on songe, par exemple, au concept d'information en Biologie), devraient être progressivement éliminés après avoir rempli leur fonction heuristique. Dans cette vision de la science, seul le mathématicien, qui sait caractériser et engendrer les formes stables à longue portée, a le droit d'utiliser les concepts (mathématiques); seul, au fond, il a le droit d'être intelligent.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] René Thom, 'Language et catastrophes', in M. M. Peixoto (ed.), *Dynamical Systems*, Proceedings of a symposium held in Salvador, Brazil; Academic Press, New York and London, 1973, pp. 619–654.
- [2] G. Bataille, *Théorie de la religion*.