



INSTITUT
DIDEROT

Les Carnets des Dialogues du Matin

HENRI ATLAN

L'avenir de la prédiction

www.institutdiderot.fr

Les Carnets des Dialogues du Matin

HENRI ATLAN

L'avenir de la prédiction

Sommaire

Avant-propos

p. 5

Jean-Claude Seys

L'avenir de la prédiction

p. 7

Henri Atlan

Avant-propos

Connaître l'avenir a toujours été une obsession pour l'homme, même aux temps où l'environnement évoluait peu dans le temps de vies brèves.

Le progrès scientifique, qui est à l'origine d'une accélération du changement dans la plupart des dimensions de la vie, a permis à la prévision de se distinguer des prédictions intuitives ou magiques antérieures et de parvenir, dans certaines conditions, à un degré élevé de fiabilité.

Cette prévision scientifique repose sur la possibilité de représenter le phénomène dont on veut prévoir l'état futur par un modèle, validé par l'expérience ou l'observation. Malheureusement, l'élaboration d'un modèle d'un système comportant beaucoup d'éléments devient rapidement compliquée. La complication peut être surmontée par l'utilisation de méthodes mathématiques sophistiquées et de moyens informatiques puissants : mais l'existence de limites dans la compréhension des phénomènes tenant tant aux incertitudes sur l'identification des principes actifs que de la mesure de leurs influences respectives sape la fiabilité des modèles de systèmes complexes.

C'est particulièrement vrai des systèmes vivants et sociaux que la science appréhende à travers des manifestations particulières d'ensembles plus vastes : économie par rapport à l'ensemble des phénomènes humains par exemple.

La modélisation présente également d'autres faiblesses : la méthode expérimentale classique consiste à étudier un système en faisant varier un par un les paramètres qui le déterminent. Mais la relation de cause à effet n'est pas toujours univoque. Ainsi, nous explique Henri Atlan, contrairement aux espoirs soulevés par le décodage du génome, on s'aperçoit aujourd'hui que l'expression d'un gène est influencée par d'autres facteurs, qu'elle peut prendre des formes différentes et que d'autres gènes peuvent la déterminer.

Dans certaines disciplines, des expériences multiples permettent de valider progressivement les modèles ; dans d'autres cas, seules sont disponibles des observations du réel, non reproductibles à volonté, les modèles sont alors sous-déterminés.

Ainsi, l'observation d'une corrélation entre la température et la pression d'un gaz, à partir de trois mesures, peut-elle être représentée par une multitude de courbes, dont l'extrapolation aboutira à des prévisions totalement divergentes, voire opposées.

Ce n'est que lorsque les observations sont en nombre élevé par rapport à celui des facteurs -et des relations entre eux- interagissant dans le système que la modélisation acquiert sa fiabilité. En conséquence, plus un système est complexe et singulier, plus il existe de modèles possibles pour le représenter et moins il est possible d'établir quel est le bon. Cette incertitude a conduit à définir et introduire dans notre Constitution, un principe de précaution selon lequel aucune action ne doit être engagée dont on ne peut être assuré qu'elle n'aura pas de conséquences néfastes pour l'homme ou son environnement.

La preuve de l'inexistence future d'un fait, qui plus est dans un temps et un espace non définis, est méthodologiquement infaisable. L'inaction qu'impose ce principe, dès lors que l'action est possible, peut elle-même être dommageable. L'incertitude doit conduire à la prudence et à la prévention, mais à la prudence aristotélicienne, au cas par cas : le postulat selon lequel l'inaction serait vertueuse et l'action dommageable n'a pas de fondement.

Jean-Claude Seys
Président de l'Institut Diderot

L'avenir de la prédiction

Le titre est provocateur et je n'en suis que partiellement responsable. Comme on le dit parfois dans ce qui se veut une boutade, « la prédiction est toujours difficile, surtout quand il s'agit de l'avenir ». Par conséquent, vouloir prédire ce qu'il en sera de la prédiction dans l'avenir paraît surréaliste. Il vaut mieux se contenter de dire ce qu'il en est de la prédiction aujourd'hui, telle qu'on l'observe chez ceux et celles qui en sont spécialistes.

Il y a plusieurs sortes de prédictions : à court terme ou à long terme, spécifiques et, éventuellement, quantitatives ou très générales et donnant lieu à des interprétations diverses ; prédictions de voyant(e)s et autres astrologues ou prédictions *scientifiques*. Je me bornerai ici aux prédictions scientifiques en commençant par faire une remarque à propos des prédictions qui portent sur l'avenir de la science elle-même et des avancées technologiques, dont on prétend pouvoir les prévoir. Ce type de projections se rapproche de la science fiction, et ce d'autant plus qu'on se projette sur un avenir plus lointain. Je suis sceptique sur la valeur de ces projections, sauf à très court terme, à cause de ce que nous avons pu constater au cours du XX^{ème} siècle. Personne, au début du siècle, n'aurait pu prévoir les conditions dans lesquelles nous vivons actuellement du fait de l'intrication de découvertes scientifiques majeures, d'innovations technologiques totalement imprévues et des modifications des mœurs qui les ont accompagnées.

Je vais donc me borner dans ce texte à analyser deux problèmes posés par le développement des sciences depuis la deuxième moitié du XX^{ème} siècle. L'un de ces

problèmes est *la sous-détermination des théories par les faits ou des modèles par les observations*. L'autre est l'invention du principe de précaution comme prétendu moyen de décision en situation d'incertitude scientifique, c'est-à-dire quand l'état des connaissances ne permet pas de prédire les conséquences de l'application de telle ou telle innovation technologique.



La sous-détermination des modèles par les observations est un problème que nous rencontrons de plus en plus dans ce qu'on appelle, à tort ou à raison, *les sciences de la complexité*. Je dois donc dire quelques mots pour commencer sur cette nouvelle problématique des sciences de la complexité qui a fait exploser le nombre de travaux de modélisations mathématiques et informatiques. L'impulsion en est surtout venue de l'évolution de la biologie et des sciences cognitives et les techniques de modélisation sont empruntées, quant à elles, plutôt à la physique et à l'informatique. Etant biologiste moi-même, vous me pardonnerez de me référer à l'évolution de la biologie plus en détails qu'à celle d'autres disciplines.

I- A. Brève histoire de la complexité

La notion de *complexité* n'est restée pendant longtemps qu'intuitive, un simple mot pour désigner nos difficultés à faire face à une situation donnée. C'est dans ce sens que Jacques Monod l'utilisait quand il observait, dans son livre célèbre *Le hasard et la nécessité*¹, que l'organisation biologique est fondamentalement la même que celle des cristaux, mais « plus complexe ». A peu près à la même période, cependant, John von Neumann² prédisait

1. J. Monod, *Le hasard et la nécessité*, Paris, Le Seuil, 1970

2. J. von Neumann, *Theory of Self-Reproducing Automata*, ed. by A. W. Burks, Urbana (Ill), University of Illinois Press, 1966.

l'émergence au XX^{ème} siècle d'une science de la complexité. Il partait d'une déclaration intuitive à propos de la complexité fonctionnelle : « un objet est du plus haut degré de complexité s'il peut "faire des choses" très difficiles et intriquées ». Il reconnaissait que le concept en était encore « vague, non scientifique et imparfait », soulignant néanmoins « une propriété décisive de la complexité », à savoir qu'il existe une taille critique en deçà de laquelle le processus de synthèse dégénère, mais au-delà de laquelle ce même phénomène, dans des conditions adéquates, peut devenir « explosif ».

Finalement, utilisant indistinctement les notions de « complication » et de « complexité », il concluait : « Rien de tout cela ne pourra sortir du domaine des énoncés vagues tant que l'on n'aura pas défini correctement le concept de « complication ». Et on ne peut le définir correctement tant que l'on n'a pas examiné en détails quelques exemples décisifs, c'est-à-dire quelques-unes des constructions manifestant les propriétés fondamentales et paradoxales de la complication. Il n'y a rien de nouveau dans tout cela. Il en est allé exactement de même avec les propriétés de conservation et de non-conservation en physique, avec les concepts d'énergie et d'entropie, et avec d'autres concepts essentiels. Les systèmes mécaniques et thermodynamiques les plus simples ont nécessité de longues discussions avant que les concepts corrects d'énergie et d'entropie aient pu en être extraits. »

Il s'agit là d'un véritable programme de recherches qui commence maintenant à se réaliser. Pour sortir du domaine des « énoncés vagues », nous avons commencé par distinguer la complexité de la complication³, en ce que celle-ci implique *un grand nombre* de données à traiter mais une *compréhension adéquate* de la façon de les ordonner, comme dans une machine compliquée, fabriquée suivant un plan bien connu avec une certaine finalité définie par son concepteur. Au contraire la complexité implique en

3. H. Atlan, *Entre le cristal et la fumée*, Paris, Seuil, 1979.

outre une difficulté de *compréhension* devant un système qui n'est qu'*imparfaitement connu*. Très schématiquement, on peut dire que la complexité est *une propriété de systèmes ou de machines dont nous ne connaissons ni les plans ni la finalité de leur concepteur*. C'est évidemment le cas de machines naturelles telles que les organismes dont il est loin d'être évident que la nature les ait fabriquées avec quelque finalité que ce soit. C'est aussi le cas des systèmes sociaux. Même si les individus constituant ces systèmes sont des agents humains poursuivant chacun des fins, à l'aide de procédures particulières plus ou moins bien définies, l'ensemble de la société présente les propriétés des systèmes complexes parce que sa structure et son fonctionnement ne sont qu'*imparfaitement compris* et qu'elle n'a pas été construite par un concepteur en vue d'une fin bien définie.

C'est pourquoi, dans des domaines aussi différents que la biologie, l'écologie, la sociologie, l'économie et même l'esthétique, le besoin d'une science de la complexité s'est fait sentir de plus en plus, conformément à la prévision de Von Neumann. Ce besoin était en outre encouragé par le développement de nouveaux outils mathématiques et informatiques de plus en plus puissants -auquel Von Neumann a d'ailleurs lui-même contribué- qui laissait espérer des progrès significatifs dans l'analyse des systèmes complexes.

Von Neumann nous avertissait par contre, à juste titre, qu'il ne suffirait pas d'utiliser le mot « complication » (ou « complexité ») pour rendre compte des phénomènes. Il faudrait plutôt reconnaître que la valeur explicative de ce mot est très limitée et que, de fait, il désigne des phénomènes et des choses qui restent à expliquer.

I- B. L'exemple de la biologie

L'histoire récente de la biologie au cours de ces quinze dernières années lui donne amplement raison. L'immunologiste cancérologue George Klein introduisait, il y a quelques années, un séminaire sur les voies de transmission de signaux cellulaires qui pouvaient se

trouver perturbées dans le cancer en avertissant que « les biologistes désormais doivent non seulement vivre avec la complexité mais l'aimer (*not only live with complexity but love complexity*) ». Il citait en fait Tony Parson qui soulignait, à propos de la transduction du signal en biologie cellulaire (de la membrane vers le cytoplasme et le noyau), que la complexité que nous y découvrons n'est rien comparée à celle qu'elle recèle en réalité⁴.

Durant les quarante à cinquante dernières années, l'idéal classique qui vise à expliquer des observations très complexes en les réduisant à des lois et à des mécanismes simples semblait avoir été atteint en biologie grâce à la découverte du code génétique et de son universalité. Il s'agissait, en effet, d'une découverte extraordinaire, celle d'une loi invariante sous-tendant tous les processus biologiques. Par conséquent, un réductionnisme génétique couronné de succès semblait à portée de main et la réalisation du projet d'analyse des génomes était supposée répondre à cette attente.

Mais ce n'est pas ce qui s'est produit. En réalité, la réalisation de ce projet a mis en évidence que tout n'était pas inscrit dans les séquences d'ADN, même au niveau moléculaire et cellulaire. L'ère « post-génomique » dans laquelle nous sommes entrés depuis est dénommée de différentes façons : « génomique fonctionnelle », « protéomique » ou « cellulomique », « biocomplexité » ou « biologie systémique ». Ces expressions ont pour but de souligner la nécessité de comprendre les mécanismes sous-jacents aux fonctions biologiques, dans le contexte de la structure *tridimensionnelle* des protéines, irréductible aux séquences nucléotidiques *linéaires* des ADN, et des *interactions régulatrices* entre les protéines, les acides nucléiques, les petites molécules et les ions dans une seule cellule. Une cellule est en effet caractérisée par un réseau de centaines de réactions chimiques, activées ou réprimées différemment en fonction du type de cellule

4. Communication personnelle.

et de l'état dans lequel cette cellule se trouve : normal ou pathologique, au repos ou en division, sécrétant ou non tel ou tel facteur hormonal ou autre. Tous les motifs structuraux et fonctionnels ne sont pas déterminés de manière simple par le génome comme s'il s'agissait de l'exécution d'un programme informatique. Les structures d'ADN s'apparentent plutôt à des données statiques, stockées dans une mémoire, transmises de cellule en cellule et d'une génération à l'autre, et traitées par le reste de la machinerie cellulaire. C'est cette dernière qui exécute vraiment les fonctions. Même cette métaphore doit être corrigée en soulignant que la structure du réseau biochimique fonctionnel d'une cellule dans un état donné est modifiée lorsque le profil d'activation des gènes est modifié. Le tableau qui en résulte est celui, que nous avons suggéré, d'un *réseau évolutif* dont les changements de structure sont le résultat de son activité. Le système classique « un gène - une protéine - une fonction » est l'exception plutôt que la règle. Non seulement un gène code pour plusieurs protéines et une protéine est le produit de plusieurs séquences d'ADN, mais il arrive aussi qu'une seule et même protéine assure, dans une cellule, plusieurs fonctions totalement différentes, apparemment sans lien entre elles, suivant sa localisation et son microenvironnement c'est-à-dire ses interactions multiples avec d'autres molécules.

Pour analyser ces systèmes d'interactions complexes, la méthode expérimentale classique qui consiste à faire varier un seul paramètre à la fois, tout le reste étant égal par ailleurs, n'est pas suffisante. L'utilisation de techniques sophistiquées de biologie moléculaire, telles que celles donnant naissance aux animaux génétiquement modifiés, était censée permettre l'application de cette méthode au niveau moléculaire et cellulaire, comme cela avait été le cas aux temps pionniers de la physiologie au niveau des organes et des organismes, en supprimant ou en augmentant de façon ciblée l'activité de gènes repérés un par un. Bien que des résultats non négligeables aient été obtenus par ce procédé, il est néanmoins surprenant

de constater parfois que l'invalidation, chez une souris, d'un gène impliqué dans de nombreuses fonctions vitales puisse avoir relativement peu de conséquences physiologiques. Ceci indique l'existence d'une redondance fonctionnelle plus importante que prévue.

Les conséquences en sont, d'une part, une plasticité cellulaire que, par exemple, l'étude des cellules souches embryonnaires fait apparaître de plus en plus. Mais d'autre part, comme nous allons le voir, cette redondance augmente une difficulté inhérente à la modélisation des systèmes complexes, à savoir la *sous-détermination des modèles par les observations*.

I- C. La modélisation

La modélisation est maintenant le mot-clé. Comment allons-nous concevoir une image intelligible d'une cellule ou d'un ensemble de différentes populations cellulaires en rassemblant leurs constituants (organelles, macromolécules, réactions chimiques, transports) de telle manière que le modèle reproduise ce qui est observé ? Et plus généralement, qu'est-ce qu'un modèle ? De quoi parle-t-on quand on se propose de faire le modèle d'une machine ou d'un système naturel complexe, non seulement en biologie, mais aussi en géologie, en astronomie, dans les sciences du climat ? La question se pose aussi pour les sciences de l'homme telles que la sociologie, l'économie, bien que la situation est ici plus intriquée puisque les agents du système y sont en même temps sujets et objets, observés et observateurs, modélisés et modélisateurs.

Construire un modèle de quelque chose, c'est d'abord *faire des prédictions sur le passé*, sur ce qui est déjà connu de cette chose, ce qui montre que la boutade de mon introduction comporte une part de sérieux. Il s'agit, à partir d'une connaissance partielle des constituants d'un système et de l'observation de ses propriétés globales (structure, performances, comportement, évolution temporelle), de concevoir les plans d'une machine ayant les mêmes propriétés. C'est ce que l'on appelle parfois faire de « l'ingénierie inverse ».

Mais le rapport du modèle à la chose n'est pas le même pour tous. Pour le mathématicien, comme pour le peintre ou le sculpteur, le modèle est la chose, vue d'un certain point de vue, nature morte ou personne qui éventuellement prend la pose, tandis que la forme mathématique et l'œuvre d'art s'en inspirent. Au contraire, pour le physicien, le biologiste et les autres praticiens des sciences d'observation, le modèle est une *représentation abstraite, souvent mathématique ou informatique, de la chose ou d'un phénomène.*

Et le modèle n'est pas le même pour l'ingénieur et pour le modélisateur par ingénierie inverse. Pour l'ingénieur, le modèle est le plan suivant lequel il va concevoir et fabriquer une machine en vue de réaliser certaines fonctions et performances. Pour le modélisateur d'un phénomène naturel, la machine est déjà là et l'on se demande comment elle est faite ; le modèle est ici un plan ou une ébauche de plan qui permettrait de fabriquer une machine capable à nos yeux des mêmes performances. L'ingénieur conçoit une machine artificielle qui n'existe pas encore et la fabrique en vue d'un fonctionnement défini à l'avance. A l'inverse, le modélisateur d'une machine naturelle l'observe en fonctionnement et tente de concevoir sa structure de façon à comprendre ce fonctionnement de la façon la plus vraisemblable possible compte tenu de ce qu'il en sait.

Nous devons donc, d'une part, apprendre des ingénieurs et informaticiens experts en ingénierie proprement dite ("directe" si l'on peut dire), à concevoir des modèles mathématiques et informatiques de machines destinées à effectuer une fonction donnée en assemblant diverses parties de manière appropriée. En connaissant les propriétés individuelles de ces parties et la façon dont elles sont interconnectées et s'influencent mutuellement, on peut calculer le comportement de l'ensemble. Bien entendu, cet ensemble peut lui-même, à son tour, être utilisé comme l'une des parties d'un niveau plus intégré d'organisation. C'est ainsi que des machines complexes sont construites... incluant les ordinateurs nécessaires au

développement de ces modèles.

Mais il faut, d'autre part, garder à l'esprit que ce type d'expertise de modélisation peut se révéler frustrant s'il est appliqué tel quel, dans une ingénierie *inverse*, à la tâche de comprendre comment sont construites et fonctionnent des machines *naturelles*, non fabriquées par l'homme, telles que des cellules, des organismes et, dans une certaine mesure, des sociétés. La nature n'a pas construit ces machines à partir d'un plan conçu pour l'occasion par un ingénieur. C'est ici que les physiciens, les ingénieurs et les informaticiens tentés de relever ce défi doivent puiser dans ce que les biologistes ont accumulé d'observations partielles et souvent contradictoires. La structure biologique n'est pas nécessairement celle qu'un ingénieur intelligent aurait choisie pour accomplir la même fonction. La rationalité de la nature n'est pas toujours celle d'un architecte, même avec l'aide de la sélection naturelle, n'en déplaise aux partisans de l'épistémologie évolutive. La métaphore du bricolage, proposée par François Jacob⁵, est ici plus adaptée que la recherche raisonnée et rationnelle des moyens les plus élégants et économiques d'atteindre un but. Souvenons-nous que cette métaphore a été empruntée à l'anthropologue Claude Lévi-Strauss qui l'utilisait pour décrire le genre d'outils développés par des populations qui ne connaissaient rien de la science moderne et de la technologie⁶. Cela signifie que différents types de rationalité peuvent être à l'œuvre dans la nature, y compris dans la nature humaine. Il en découle que nous pouvons rencontrer des difficultés inattendues et, peut-être, des limitations intrinsèques dans l'habituelle règle du jeu de la modélisation quand nous l'appliquons à la compréhension d'organisations naturelles complexes, même au niveau d'une seule cellule.

5. F. Jacob, *Le jeu des possibles*, Paris, Fayard, 1981.

6. C. Lévi-Strauss, *La pensée sauvage*, Paris, Plon, 1962, rééd. collection Pocket, 1990, pp. 30 et sq.

C'est là que nous rencontrons cette *sous-détermination des modèles par les observations* dont je veux vous parler, qui est peut-être une limitation à nos possibilités d'analyses de systèmes naturels complexes.

I- D. La sous-détermination des modèles par les observations

Différentes techniques ont été proposées pour mesurer la complexité des données, des observations ou des programmes ; mais, de façon plus profonde, la complexité d'un phénomène naturel se traduit par une difficulté intellectuelle à en former une théorie ou un modèle explicatif satisfaisant. Et cette difficulté avait été autrefois exprimée très justement par le syntagme « sous-détermination des théories par les faits » par les philosophes des sciences Pierre Duhem⁷ (comme une propriété des théories physiques) puis Willard O. Quine⁸ (à propos d'une théorie de la traduction). Mais ces auteurs n'envisagèrent la sous-détermination des théories que du point de vue très général du rapport de la théorie à la réalité.

Or une difficulté du même type, mais beaucoup plus pratique, est le propre des techniques d'ingénierie inverse où il s'agit de *construire un modèle capable d'expliquer en les reproduisant les performances ou les effets d'un système naturel tels que nous les observons*.

En effet, quand on s'intéresse à un système naturel constitué d'un nombre important de variables observables, liées entre elles de telle sorte que différents états structuraux et fonctionnels de l'ensemble peuvent être observés, *il existe en général de nombreux modèles possibles d'interactions permettant de prédire les mêmes états observés*. C'est cette difficulté, qui tient à ce que, dans certaines

7. P. Duhem, *La Théorie physique. Son objet, sa structure*, Paris, Marcel Rivière, 1914, chap. 1-2.

8. W. O. Quine, *Word and Object*, Cambridge (MA), MIT Press, 1960, chap. I.6 et II.16.

circonstances, *trop de « bons » modèles peuvent être construits pour un même ensemble de données observées*, qui caractérise la sous-détermination des modèles par les observations. Le calcul par réseaux d'automates permet de décrire précisément et de mesurer, ou du moins d'exprimer de façon semi-quantitative, la sous-détermination d'un modèle par les faits d'observation et d'analyser les circonstances dans lesquelles il faut en tenir compte⁹. Le plus simple est de vous présenter un cas concret où je me suis heurté à ce problème en travaillant à la modélisation d'une partie du système immunitaire. Il s'agissait de modéliser des réactions immunitaires observées *in vivo*, à l'aide de réseaux d'automates, dits de « neurones » parce qu'ils reproduisent formellement certaines propriétés logiques du fonctionnement électrique des vrais neurones. Chaque modèle est ici représenté par une structure de connexions donnée d'un réseau dont les unités sont des automates qui représentent les différents facteurs ou processus en cause. Or, pour un même nombre d'unités, *de nombreuses structures de connexions, avec des dynamiques très différentes, peuvent générer les mêmes états stables observables*, et le nombre de telles structures augmente très vite avec le nombre d'unités. Pour un nombre N d'unités interconnectées, le nombre d'états observables sur l'ensemble du système augmente comme une puissance N du nombre d'états observables sur chaque unité tandis que le nombre de structures de modèles possibles augmente comme une puissance N^2 du nombre de valeurs possibles que peut prendre chaque connexion.

Si N est le nombre d'unités, le nombre de connexions possibles est N^2 , et le nombre de structures possibles est 2^{N^2} s'il n'existe pour chaque connexion que deux possibilités : exister ou ne pas exister. Ce nombre devient 3^{N^2} si chaque connexion peut être soit excitatrice, soit

9. H. Atlan, *Tout, non, peut-être. Éducation et vérité*, Paris, Seuil, 1991, chap. 3 et 4.

inhibitrice, soit inexistante ; et plus généralement p^{N^2} si chaque connexion peut être pondérée et son poids peut avoir p valeurs. Quoi qu'il en soit, ce nombre est toujours une puissance N^2 , alors que le nombre d'états stables possibles d'un réseau de N automates ne peut pas être plus grand que le nombre d'états, soit 2^N s'il s'agit d'automates binaires et q^N si chaque automate peut occuper q états. Ainsi, le nombre de structures de réseaux est généralement beaucoup plus grand que celui des états observables, pour un nombre donné d'unités interconnectées.

Ce phénomène est déjà important pour des petits réseaux, de l'ordre de moins d'une dizaine d'éléments, et il ne fait évidemment que s'accroître quand le nombre d'éléments augmente. Dans l'exemple que j'étudiais, il s'agissait d'un réseau de seulement cinq populations de lymphocytes (cellules du système immunitaire) qui avaient été identifiées comme participant au déclenchement, à la prévention et au traitement d'une maladie auto-immune expérimentale chez l'animal. Le modèle devait permettre d'identifier les interactions, c'est-à-dire les connexions entre ces populations de cellules, représentées chacune par une unité d'un réseau. Mais on voit que, déjà pour un réseau de 5 unités binaires, le nombre d'états est 2^5 soit 32, tandis que le nombre de structures de connexions possibles est au moins 2^{25} soit environ 10 millions.

Est-ce à dire que ce phénomène existe toujours et qu'aucun modèle n'y échappe, ce qui impliquerait à la limite l'absence totale de fiabilité des connaissances scientifiques acquises de cette façon ? Certainement pas. Il est facile de concevoir, d'après le calcul précédent, dans quels cas il peut ne pas exister de sous-détermination du modèle. *Il faut que le nombre de données d'observations soit suffisamment grand par rapport au nombre de variables et de structures de connexions possibles.* Autrement dit, il faut que q soit beaucoup plus grand que p (plus précisément, $q > p^N$), de telle sorte que le nombre d'états possibles soit plus grand que le nombre de structures possibles du

réseau ; ou encore que l'on puisse observer non seulement les états stables mais aussi les dynamiques elles-mêmes avec leurs états transitoires sur les trajectoires qui mènent aux attracteurs¹⁰. Ceci implique une précision très grande dans l'observation, en sorte que le nombre de faits discriminables puisse être très grand. Ceci est idéalement réalisé quand on a affaire à des variables continues, dont on peut observer en pratique les variations de façon presque continue. Dans ces conditions, évidemment, la sous-détermination des modèles par les observations peut être réduite et même disparaître.

Or ces conditions sont celles de la méthode scientifique classique, qui décompose les phénomènes étudiés en éléments relativement simples et peu nombreux sur lesquels beaucoup d'observations et de mesures peuvent être effectuées. C'est pourquoi la sous-détermination des modèles n'est habituellement pas prise en compte dans la confiance que l'on peut avoir dans la connaissance scientifique. Ces conditions sont réunies dans l'expérimentation sur des systèmes artificiels, montés en laboratoire de façon simplifiée, tels que les variables pertinentes puissent être observées séparément avec la plus grande précision possible et que l'on puisse avoir un accès direct à la nature des interactions entre composants, que représentent les connexions.

Mais c'est rarement le cas quand il s'agit de systèmes *naturels*, comportant plusieurs processus couplés, et d'autant moins que le nombre de ces processus est élevé, car les données empiriques nécessaires en grand nombre, sur les états observables et sur les interactions, sont en général inaccessibles. Il en résulte que, dans ces situations, de nombreux modèles différents peuvent expliquer les états observés sans que l'on ait le moyen

10. Par « attracteur » on entend, dans un système dynamique, un état vers lequel ce système évolue de manière irréversible en l'absence de perturbations.

de décider en faveur de l'un d'entre eux, à moins d'augmenter le nombre d'observations disponibles si les conditions expérimentales le permettent.

On voit que cette propriété n'est pas spécifique, comme on l'a longtemps cru, aux phénomènes humains, psychologiques, linguistiques ou autres, et ne résulte donc pas d'un rapport de la théorisation aux faits découlant d'aspects mystérieux de la relation corps/esprit.

Beaucoup plus simplement, *elle provient de l'augmentation rapide du nombre de modèles théoriques possibles, différents mais équivalents quant à leur pouvoir prédictif de faits d'observation, dès que ces faits sont déterminés par les effets couplés de plusieurs facteurs ou processus.* Le nombre de modèles possibles augmente en général beaucoup plus vite avec le nombre de variables que le nombre d'états observables. C'est dans les conditions d'observation de systèmes *artificiels ou artificiellement isolés et bien contrôlés*, où cette sous-détermination peut être surmontée, que s'est constituée la méthode scientifique empirico-logique classique. Mais ces conditions sont très rares dans l'observation des systèmes naturels complexes imparfaitement contrôlés. Comme cette sous-détermination provient de la méconnaissance des données empiriques qui seraient nécessaires pour la lever, elle exprime parfaitement la *complexité* de systèmes naturels dont nous n'avons qu'une connaissance partielle.

Un exemple spectaculaire de sous-détermination des modèles est fourni par un travail sur des réseaux de vrais neurones de rats cultivés en laboratoire, doués de capacités auto-organisatrices parce qu'ils établissent entre eux des connexions, et capables de mémoire et d'apprentissage¹¹. Un réseau de ce type a été programmé pour apprendre à diriger les mouvements d'un robot afin de lui permettre d'éviter des obstacles. Sa structure et

11. S. Marom & G. Shahaf, *Development, learning and memory in large random networks of cortical neurons : lessons beyond anatomy*, Quarterly Reviews of Biophysics, 2002, 35 (01), p. 63-87.

l'algorithme d'apprentissage de son fonctionnement sont évidemment connus de ceux qui l'ont construit, comme dans le cas de machines artificiellement conçues et réalisées par un ingénieur. Mais pour un observateur de leur comportement global non informé par leur concepteur, la compréhension de ces mécanismes rejoint la situation générale de modélisation par ingénierie *inverse*, où le plan de la machine et son modèle de fonctionnement doivent être induits à partir des connaissances (limitées) disponibles sur sa structure et de l'observation de ses performances. Les concepteurs de ce robot ont pu montrer qu'un modèle fondé sur un algorithme complètement différent de celui qu'ils avaient utilisé en réalité était tout aussi efficace pour expliquer son comportement¹². On a là un cas d'école de sous-détermination où un "bon" modèle est pourtant faux par rapport à la réalité du système qui se trouve ici connue et décrite par ceux qui l'ont construit.

La sous-détermination des théories par les faits apparaît comme l'une des expressions les plus spectaculaires de la manière dont la complexité naturelle limite notre pouvoir de théorisation. Et ceci est d'autant plus frappant que cette limitation ne tient pas du tout, comme on pourrait s'y attendre, à la difficulté de construire un modèle prédictif des états observés sur un système dont il s'agit de comprendre la structure et le fonctionnement. Bien au contraire, plus on a affaire à un système complexe et singulier, plus il existe un nombre trop important de modèles différents, mais équivalents et tout aussi convenables, sans que les observations disponibles soient en nombre suffisant pour permettre, idéalement, de les réfuter tous sauf un.

Remarquons toutefois que cette complexité, qui se

12. S. Marom, R. Meir, E. Braun, A. Gal, E. Kermany & D. Eytan, *On the precarious path of reverse neuro-engineering*, *Frontiers in Computational Neuroscience*, 2009, 3:5, p. 1-4.
(doi: 10.3389/neuro.10.005.2009).

traduit par une faiblesse des modèles, peut être dans les faits, pour les systèmes réels qu'il s'agit de modéliser, une propriété de *robustesse* liée à une grande stabilité structurale : des variations relativement grandes sur la structure des connexions peuvent ne pas changer leurs états stables. Il s'agirait donc d'une *redondance fonctionnelle* intrinsèque à la structure de systèmes naturels, et pas seulement d'une propriété de leurs modèles ; un avantage réel pour un système biologique et non pas une simple limitation de nos capacités de modélisation.

On connaît plusieurs exemples de ce phénomène. L'un d'eux est réalisé par les expériences de suppression (dites *knock out*) de gènes bien identifiés qui n'entraînent que peu de perturbations fonctionnelles alors que l'on connaît leur implication dans des processus biologiques fondamentaux. Un tel phénomène témoigne de l'existence d'une *redondance* qui permet à un réseau de gènes en interactions de suppléer l'absence de l'un d'entre eux par une réorganisation différente du réseau qui permette d'assurer à peu près les mêmes fonctions si bien que la suppression de l'un d'entre eux se trouve compensée par une autre structure de connexions.

L'immense complexité des voies de signalisation intracellulaires par des cascades et des boucles de réactions biochimiques fournit un autre exemple des mêmes propriétés : des interruptions ciblées de telle ou telle voie par des inhibiteurs spécifiques de réactions pourtant déterminantes sont souvent compensées par des voies parallèles. Il s'agit là probablement d'un cas particulier de réseaux d'interactions de protéines entre elles. Des cartes d'une extrême complexité commencent à en être établies, grâce au développement considérable survenu ces dix dernières années de techniques d'analyses de plus en plus fines des structures des protéines et de leurs modifications, constituant ce champ d'études dénommé « protéomique » que nous avons déjà évoqué. Enfin, étant donnée la structure de notre système nerveux central, où N se chiffre par milliards, on peut spéculer sur l'effet de cette convergence vers les mêmes

états, de réseaux neuronaux pourtant très différents dans le détail de leurs connexions. Plusieurs cerveaux forcément différents, du fait de leur histoire, dans le détail de leurs structures synaptiques (malgré l'identité de leur organisation globale), peuvent converger vers des états stables similaires, sinon identiques. C'est cela qui nous permettrait de faire l'expérience d'une intersubjectivité par laquelle nous croyons arriver à nous comprendre, au moins approximativement, et à nous accorder sur nos représentations.

Mais, que cette sous-détermination soit le fait d'une faiblesse des capacités d'observation ou d'une propriété intrinsèque des systèmes considérés, comme le rapport qui la mesure augmente exponentiellement avec N , elle constitue vraisemblablement une *limitation irréductible* aux capacités de modélisation explicative, ou réaliste, « de bas en haut » pour de tels systèmes.

Une autre difficulté découlerait de la réalisation de modèles aussi complexes que les systèmes réels qu'ils sont censés représenter. Alors, la technique de modélisation ne fournirait plus aucune aide à la compréhension du réel.

Enfin, nous devons nous arrêter sur une dernière difficulté rencontrée dans l'analyse de systèmes qui présentent une très grande variabilité individuelle. De tels systèmes peuvent associer aux problèmes liés à leur sous-détermination ceux inhérents au caractère unique, donc non reproductible, des observations sur leurs états. La biologie, humaine en particulier, fournit des exemples de telles situations. Mais elle n'est pas la seule : l'analyse critique des modèles d'évolution des systèmes écologiques ainsi que des modèles de changements climatiques, doit certainement prendre en compte ces deux limitations aux capacités prédictives des modèles de systèmes complexes naturels : sous-détermination et non reproductibilité.



Que peut-on dire maintenant du pouvoir prédictif de ces modèles sous-déterminés par les observations ? Je vais maintenant parler non de la prédiction des observations déjà disponibles et qui sont censées valider le modèle, mais de la prédiction d'observations futures, *non encore disponibles*.

On conçoit bien que des modèles différents reposant sur des hypothèses et des mécanismes différents pourront conduire à des prédictions différentes concernant des observations futures, et d'autant plus si ces observations se multiplient. C'est d'ailleurs tout l'intérêt de ces modèles qui permettent de suggérer de nouvelles expériences susceptibles de produire de nouvelles données qui permettront de falsifier et d'éliminer un certain nombre de modèles. C'est exactement ce qui se passe en biologie quand on peut expérimenter.

Mais quand ce n'est pas le cas, lorsqu'on a affaire à un système naturel complexe sur lequel on ne peut pas expérimenter, son évolution temporelle et la prédiction de l'avenir à partir du modèle ressemblent à l'extrapolation d'une courbe tracée à partir d'un petit nombre de points. Plusieurs courbes différentes peuvent passer par ces points, mais leurs extrapolations éventuelles pourront donner des prédictions différentes.

Autrement dit, nous restons en situation d'incertitude. Et c'est là que l'on rencontre le fameux *principe de précaution*.

Bien qu'inscrit dans la Constitution et ayant acquis de ce fait un statut juridique, ce principe est interprété de différentes façons suivant les usages multiples qui en sont faits. Faisant souvent l'objet d'invocations incantatoires, il est utilisé pour justifier telle ou telle mesure visant à se protéger contre un danger *potentiel*. Une première confusion consiste à considérer ces mesures comme s'il s'agissait de *prévention*. Une autre confusion concerne les possibilités d'*évaluations relatives du danger et du coût des mesures* destinées à se protéger. En fait, ces confusions, se ramènent à une faute initiale : vouloir instituer la précaution en *principe*.

II- A. La confusion de la précaution avec la prévention

Notons tout d'abord que la prévention, elle, ne fait pas l'objet d'un principe. Il s'agit, plus empiriquement, de mesures ou éventuellement de *politiques* de prévention. Et ceci pour une raison assez simple : la prévention concerne des dangers *réels* de dommages ou de catastrophes dont l'existence est *certaine* et le *risque* peut être évalué, en amplitude et en fréquence. Les mesures de prévention visent à empêcher leur survenue ou, au minimum, à atténuer l'amplitude et en diminuer la fréquence. Interdire l'alcool au volant, organiser une vaccination obligatoire à l'aide de vaccins éprouvés contre des maladies infectieuses graves et endémiques, lancer des campagnes sur l'opinion publique pour diminuer le tabagisme et l'alcoolisme, empêcher la contamination de l'eau de rivière et de source par des déchets toxiques connus et repérés : ce sont là autant d'exemples de mesures de prévention. Ces mesures sont efficaces et adaptées à des dangers connus dont on sait avec certitude qu'ils seraient beaucoup plus grands en l'absence de prévention : rôle des intoxications dans la diminution de la vigilance nécessaire à la conduite automobile, vaccins éprouvés, fréquence et amplitude des pathologies de l'alcoolisme et du tabagisme, contamination d'eau potable et destruction de populations de poissons, etc.

Il s'agit par contre de tout autre chose avec les mesures de *précaution* et en particulier celles qui sont présentées comme des applications du fameux principe. Nous avons alors affaire à des dangers *potentiels*, dont nous ne disposons pas de certitude sur leur réalité et encore moins d'une estimation plus ou moins chiffrée en amplitude et en probabilité. Dans tous les cas, le recours à la science est insuffisant. Il s'agit de situations à propos desquelles il existe une *incertitude scientifique* à la fois sur la *réalité* du danger et sur sa *gravité*. Ceci ouvre la porte à toutes les incertitudes, comme le montre un exemple extrême et caricatural, parmi bien d'autres, d'invocation du principe de précaution en médecine.

On a découvert que le traitement d'enfants par l'hormone

de croissance préparée à partir d'hypophyses prélevées sur des cadavres humains avait provoqué l'apparition de la maladie de Creutzfeldt Jacob. L'origine de cette maladie était inconnue jusqu'à la découverte des prions, nouvelle classe d'agents infectieux purement protéiques de nature inconnue jusque là. La conclusion évidente était que les cerveaux et des extraits hypophysaires prélevés sur certains cadavres étaient infectés par le prion sans que personne n'ait pu le suspecter. Résultat : une circulaire du Ministère de la Santé a alors interdit l'utilisation de tissus ou d'organes humains dans un but thérapeutique à moins de prouver qu'ils étaient indemnes de tout agent infectieux connu ou *inconnu* ! Les greffes de cornée furent ainsi interrompues pendant plusieurs mois au grand dam des patients et des ophtalmologues, jusqu'à ce que cette réglementation soit reconnue absurde et supprimée.

La nécessaire prise au sérieux de l'obligation de décider en situation d'incertitude aurait dû conduire à une attitude opposée à cette quête d'un principe d'action supposé capable de contourner l'incertitude et de dicter une conduite prétendument juste en toutes circonstances. Malgré ses formulations successives et leurs interprétations diverses, le principe de précaution joue ce rôle trompeur et, en tant que tel, il souffre du défaut logique irrémédiable *de se détruire lui-même*. Rien ne dit en effet que les mesures préconisées en application de ce principe pour éviter un danger dont on ne peut évaluer ni l'amplitude ni la probabilité, n'aient pas comme effet des dangers tout aussi incertains mais peut-être plus grands et plus probables. En application du principe de précaution, il faudrait donc s'abstenir de prendre ces mesures, et donc s'abstenir d'appliquer le principe de précaution.

Plus récemment, la campagne de vaccination contre la grippe H1N1 est venue apporter une illustration de plus, si besoin était, de ce retournement sur lui-même de ce fameux principe. Devant l'incertitude sur la gravité de cette nouvelle grippe et sur son extension épidémique

possible, une campagne de vaccinations massives fut décidée par l'OMS, impliquant une fabrication accélérée de doses de vaccins en très grand nombre, évidemment justifiée au nom du principe de précaution. Comme on sait que les nouveaux vaccins doivent satisfaire un certain nombre de critères de sécurité dont les tests demandent normalement un certain temps, un doute s'est introduit dans une partie de l'opinion, y compris médicale, sur l'innocuité de ces vaccins. Autrement dit, on a suspecté un danger potentiel dans la vaccination elle-même. Bien que ce danger fût évidemment incertain, le principe de précaution devait conduire à refuser la vaccination. C'est ce qui arriva dans un certain nombre de cas, pas toujours d'ailleurs en application du principe mais souvent par scepticisme quant à la gravité annoncée de l'épidémie. Depuis les premières formulations du principe de précaution à propos de dangers potentiels pour l'environnement, l'incertitude scientifique a toujours joué un rôle déterminant dans son énoncé et ses applications. Il faut reconnaître que les formulations plus récentes et leurs interprétations, notamment par les juristes, ont atténué la nature et le degré de cette incertitude ainsi que le caractère automatique des mesures préconisées pour éviter le danger. Le but était évidemment de ne pas tomber dans le piège de l'absurde qu'avaient révélé les excès des premières applications du principe.

C'est ainsi que, dans sa formulation inscrite dans la Constitution, il est fait mention de mesures *proportionnées* au danger à éviter. Cela implique que l'on puisse apprécier la gravité et l'amplitude du danger afin que ce qui est mis en œuvre pour l'éviter ne lui soit pas disproportionné soit par son coût, soit par d'autres dangers qui pourraient en résulter. Autrement dit, on n'est plus là en situation d'incertitude totale puisqu'on admet implicitement qu'on dispose d'une connaissance, au moins en termes de probabilité, sur le danger à éviter. Cela veut dire que, bien que l'on continue à parler de « principe de précaution », il s'agit en fait d'un principe de *prévention*, assez ancien, qui consiste à apprécier

le rapport coût/bénéfices pour orienter des prises de décision concernant des risques suffisamment connus pour pouvoir être évalués.

II- B. Un principe de couverture

Une autre façon de contourner l'impasse du principe perçu comme une garantie de décision juste en situation d'incertitude consiste à y voir non pas un principe d'action mais un principe *d'évaluation*. Suivant cette interprétation, appliquer le principe consiste à *tout mettre en œuvre, dans une situation d'incertitude scientifique sur un danger potentiel, pour évaluer la nature, l'amplitude et la probabilité du danger afin de réduire l'incertitude autant que possible*. Autrement dit, il s'agit là encore de se rapprocher le plus possible d'un problème de prévention classique fondé sur une estimation du rapport coûts/bénéfices.

Mais ces interprétations sont en fait, si l'on peut dire, des précautions de la part de spécialistes qui analysent bon gré mal gré les conditions d'application de ce « principe » désormais inscrit dans le droit. Elles passent très peu dans le grand public et les médias, et donc chez les politiques. Il est plus facile de prendre des décisions supposées justes parce que découlant d'un principe inattaquable, résolvant ainsi, croit-on le problème de l'incertitude. Le principe est donc appliqué pratiquement de façon beaucoup plus simple et assez brutale. Devant un danger réel ou potentiel, des mesures de précaution sont prises par ceux qui sont en charge et le principe est invoqué pour les justifier et prévenir des critiques toujours possibles. Il s'agit là d'une attitude dont on peut faire remonter l'origine au scandale du sang contaminé, qui a sans aucun doute marqué un tournant dans les rapport entre experts scientifiques et décideurs politiques. La mise en cause, avec poursuites judiciaires, de ministres et de conseillers a produit un sentiment d'insécurité chez ceux qui doivent décider et sont, comme on dit, « aux responsabilités ». D'où un besoin de *couverture* en s'en remettant systématiquement à l'avis des experts. Et quand celui-ci est incertain, l'invocation du principe de

précaution est là pour servir de couverture aux décisions et les justifier devant des critiques éventuelles.

Les conséquences de cet état de choses sont loin d'être négligeables. C'est l'institution du règne de la peur irrationnelle dans ce que j'avais appelé « les trois pouvoirs de la parole »¹³ : le pouvoir scientifique, le pouvoir médiatique et le pouvoir politique d'où procède la décision. L'exercice de ces trois pouvoirs est indispensable en démocratie mais ils doivent être *séparés* pour être en mesure de se critiquer l'un l'autre, au lieu de s'appuyer l'un sur l'autre dans une spirale d'amplifications. Et ceci est d'autant plus nécessaire lorsqu'il s'agit de questions sur lesquelles l'expertise scientifique est incertaine et parfois divisée. L'amplification médiatique des avis des experts simplifiés dans leur utilisation politique aboutit à une espèce de consensus de l'opinion qui justifie en retour des décisions ainsi couvertes par le principe de précaution. Notons toutefois, contrairement à ce à quoi on pouvait s'attendre, que pour des raisons tenant à des chocs de croyances et d'idéologies technophiles et technophobes, le principe de précaution n'est en général pas invoqué dans les discussions de bioéthique sur les procréations médicalement assistées. Pourtant, on a ici aussi affaire à des dangers potentiels, plus liés d'ailleurs à l'expérimentation sociale de nouvelles filiations qu'aux techniques biologiques proprement dites. Mais le désir d'enfant biologique à tout prix fait ici surmonter la peur ou même l'ignorer.

Par contre, deux exemples d'application du principe sont caricaturaux : les OGM et les nanotechnologies. Les nouvelles technologies définissent un domaine marqué par des incertitudes multiples sur leurs applications possibles et sur les bienfaits et les dangers auxquels elles peuvent exposer. L'attitude raisonnable consisterait à analyser chacune des applications concevables au cas par cas pour en évaluer autant que possible les dangers potentiels et les bienfaits qu'on en peut attendre.

13. H. Atlan, *Tout, non, peut-être. Education et vérité*, Paris, Seuil, 1991.

Mais il faut reconnaître que l'expertise scientifique en situation d'incertitude est difficile. Ni l'opinion, ni les politiques n'aiment rester dans l'incertitude et ils influencent en cela l'exercice de l'expertise. Peu d'experts ont le courage d'annoncer qu'ils ne peuvent pas répondre à la demande d'avis même en termes de probabilité. La tentation sera donc le plus souvent de donner quand même une réponse, soit pour rassurer, soit pour mettre en garde. Les affaires du sang contaminé ont constitué sur ce point aussi un tournant. Avant le scandale, c'était la tendance à *rassurer* qui semblait dominer la communauté scientifique et médicale. Après le scandale, la tendance s'est inversée en même temps que le principe de précaution s'imposait de plus en plus. Aujourd'hui, les experts préfèrent de loin être des prophètes de malheur. Comme l'avait bien compris le prophète Jérémie, on risque moins à annoncer une catastrophe qu'une bonne chose car, en cas d'erreur, on pourra toujours arguer de ce que la catastrophe a été évitée grâce à ceux qui l'avaient annoncée. Le principe de précaution étant passé par là, émettre des doutes sur la catastrophe annoncée est déjà dangereux pour les experts dont on attend certitudes et recommandations fermes.

On invoque parfois, à tort ou à raison, le philosophe Hans Jonas et son heuristique de la peur comme fondement philosophique du principe de précaution¹⁴. Mais le résultat de son application débridée est tout simplement la peur, sans heuristique.

Il serait souhaitable de revenir à la prudence aristotélicienne, au cas par cas, sans la garantie illusoire d'un soi-disant principe. Principe de couverture plutôt que de précaution, il est temps de faire preuve de sagesse et de prudence justement dans ses applications.

Retrouvez l'intégralité du débat en vidéo sur www.institutdiderot.fr

14. H. Jonas, *Le principe de responsabilité*, Paris, Editions du Cerf, 1990

Les publications de l'Institut Diderot

Dans la même collection

L'avenir de l'automobile

Louis Schweitzer

Les nanotechnologies & l'avenir de l'homme

Etienne Klein

L'avenir de la croissance

Bernard Stiegler

L'avenir de la régénération cérébrale

Alain Prochiantz

L'avenir de l'Europe

Franck Debié

L'avenir de la cybersécurité

Nicolas Arpagian

L'avenir de la population française

François Héran

L'avenir de la cancérologie.

Une illustration des crises à venir de l'hôpital

François Goldwasser

L'avenir de l'aménagement des territoires

Jérôme Monod

Les Notes de l'Institut Diderot

L'euthanasie, à travers le cas de Vincent Humbert

Emmanuel Halais

Les Dîners de l'Institut Diderot

La Prospective, de demain à aujourd'hui

Nathalie Kosciusko-Morizet

L'avenir de la prédiction

Connaître l'avenir a toujours été une obsession pour l'homme, même aux temps où l'environnement évoluait peu dans le temps de vies brèves.

Le progrès scientifique, qui est à l'origine d'une accélération du changement dans la plupart des dimensions de la vie, a permis à la prévision de se distinguer des prédictions intuitives ou magiques antérieures et de parvenir, dans certaines conditions, à un degré élevé de fiabilité. [...]

La méthode expérimentale classique consiste à étudier un système en faisant varier un par un les paramètres qui le déterminent. Mais la relation de cause à effet n'est pas toujours univoque. Ainsi, nous explique Henri Atlan, contrairement aux espoirs soulevés par le décodage du génome, on s'aperçoit aujourd'hui que l'expression d'un gène est influencée par d'autres facteurs, qu'elle peut prendre des formes différentes et que d'autres gènes peuvent la déterminer.

Dans certaines disciplines, des expériences multiples permettent de valider progressivement les modèles ; dans d'autres cas, seules sont disponibles des observations du réel, non reproductibles à volonté, les modèles sont alors sous-déterminés.

Jean-Claude Seys, Président de l'Institut Diderot



Henri Atlan



Professeur émérite de biophysique à l'université Paris VI, directeur d'études en philosophie de la biologie à l'EHESS (Paris) et directeur du Centre de recherche en biologie humaine à l'hôpital universitaire Hadassah (Jérusalem).

