

RESEARCH OUTPUTS / RÉSULTATS DE RECHERCHE

Qu'est-ce que la complexité?

Laurent, Nathanael

Published in:
Revue des Questions Scientifiques

Publication date:
2011

[Link to publication](#)

Citation for pulished version (HARVARD):

Laurent, N 2011, 'Qu'est-ce que la complexité?', *Revue des Questions Scientifiques*, numéro 3, pp. 253-272.

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Qu'est-ce que la complexité ?

NATHANAEL LAURENT

Université de Namur et Université Catholique de Louvain, Belgique.

nathanael.laurent@unamur.be

1. INTRODUCTION

Laissons à Edgar Morin, auteur incontournable lorsqu'il s'agit de s'initier à la pensée complexe, le soin de donner le ton à notre propos :

« Nous sommes encore aveugles au problème de la complexité. Les disputes épistémologiques entre Popper, Kuhn, Lakatos, Feyerabend, etc., la passent sous silence. Or cet aveuglement fait partie de notre barbarie. Il nous fait comprendre que nous sommes toujours dans l'ère barbare des idées. Nous sommes toujours dans la préhistoire de l'esprit humain. Seule la pensée complexe nous permettrait de civiliser notre connaissance. »¹

Le terme « complexe » (et ses dérivés) a bien sûr été utilisé dans d'autres contextes que celui de cette pensée qui se veut nouvelle, et à laquelle nous introduit Morin. Il sera d'ailleurs aisé de trouver des significations allant dans d'autres directions, et parfois dans une direction tout à fait opposée. Cette situation pourrait finalement nous aider dans notre entreprise de donner une définition non « préhistorique » de la complexité. Nous rencontrerons plus loin un bel exemple de définition anti-complexe de la complexité avec le cas de John von Neumann, et nous verrons que d'un certain point de vue – celui défendu par le biologiste et

¹ E. Morin, *Introduction à la pensée complexe*, Paris, Editions du Seuil, 2005, p. 24.

mathématicien Robert Rosen – cette définition concerne non pas la « complexité » mais tout au plus la « complication ». La définition de von Neumann est paradigmatique de multiples significations courantes données au terme « complexité » qui ont toutes trait, comme nous le verrons, à la quantification de quelque chose (une mesure), et qui s'inscrivent toutes dans la continuité (tendre ou progresser vers plus de complexité).

Morin n'est pas le seul à pouvoir penser la complexité d'une manière lucide. Lui-même cite, dans une note associée au passage précédent, deux auteurs auxquels le sens attendu de la complexité n'a pas échappé :

« Pourtant, le philosophe des sciences, Bachelard, avait découvert que le simple n'existe pas : il n'y a que du simplifié. La science construit l'objet en l'extrayant de son environnement complexe pour le mettre dans des situations expérimentales non complexes. La science n'est pas l'étude de l'univers simple, c'est une simplification heuristique nécessaire pour dégager certaines propriétés, voire certaines lois. Georges Lukács, le philosophe marxiste, disait dans sa vieillesse, critiquant sa propre vision dogmatique : "Le complexe doit être conçu comme élément primaire existant. D'où il résulte qu'il faut d'abord examiner le complexe en tant que complexe et passer ensuite du complexe à ses éléments et processus élémentaires." » (*ibid.*)

Outre Bachelard et Lukács, il est possible de retrouver la présence de cette complexité « primaire » dans bien d'autres œuvres qui questionnent la méthode scientifique elle-même. Je pense notamment à Kurt Goldstein (*La structure de l'organisme*, 1951) et, plus proche de nous, à Henri Atlan (voir plus loin). Et pourquoi pas remonter à Héraclite – souvent cité par Ludwig von Bertalanffy – et à Aristote ?

Tout ceci attise notre curiosité, mais qu'est-ce donc que la complexité ? Que doit recouvrir un tel concept pour ne pas être confondu avec le « difficile » ou le « compliqué » ? Par quels biais approcher son sens ? Peut-être que la caractéristique première de ce concept est qu'il est *autoréférentiel*. L'autoréférentialité doit ici s'entendre dans un sens bien précis qu'il nous faudra d'ailleurs découvrir : le concept de complexité est lui-même « complexe » parce que sa signification ne peut manquer de renvoyer – explicitement ou non – à l'intention de celui qui l'utilise. Une telle autoréférentialité est en réalité associée à une *généricité*.

Henri Atlan a très bien saisi cette circularité générique de la « complexité », et son dernier ouvrage intitulé *Le vivant post-génomique ou qu'est-ce que l'auto-organisation ?* (Odile Jacob, 2011) nous le montrera. Robert Rosen, qui deviendra notre référence principale, rejoint à sa manière – en s'inspirant de son équivalent en

mathématiques – cette idée qui semble fondamentale pour aborder ce qui peut être dit « complexe ».

2. LA COMPLEXITE SELON ROBERT ROSEN

Robert Rosen (1934-1998), un biologiste et mathématicien américain trop peu connu, est l'auteur de nombreux articles publiés depuis les années 50 et de plusieurs livres dont *Life Itself* (1991). Il s'est donné pour objectif de répondre à la question « Qu'est-ce que la vie ? », et sa réponse inclut une définition très précise de la complexité.

Pour Robert Rosen, la complexité est une *condition nécessaire* des systèmes naturels vivants. Ce n'est pourtant pas une condition suffisante ! Il est de fait une autre condition nécessaire que doivent remplir ces systèmes vivants, qui est celle de contenir « un circuit fermé de causalité efficiente ». Nous n'aurons pas l'occasion ici d'explicitier ce point, et donc de présenter l'entièreté de la réponse de Rosen, mais notons simplement qu'une telle clôture au niveau de la causalité efficiente représente une *forme de circularité particulière*, circularité qu'il faut entendre dans le sens d'autoréférentialité ou dans le sens mathématique d'imprédictivité. Rosen dégage ainsi une structure formelle générale valant pour tous les organismes vivants (toute organisation qui peut être dite « en vie »). Il s'agit de ce qu'il appelle un « système – (M, R) » (M pour « métabolisme » et R pour « réparation »).

Il fait également appel à la théorie des catégories pour rendre compte du processus de modélisation duquel relève toute science, et nous aurons par contre l'occasion d'explorer ce point.

Dans un article autobiographique², Rosen affirme qu'il ne cesse depuis le début de ses recherches d'être fidèle à un « impératif catégorique » relatif à cette manière nouvelle d'envisager la vie, la science, et notamment la physique et la biologie. L'approche de Rosen débouche sur une *théorie de la fabrication* ayant une portée ontologique bien distincte de l'épistémologie consistant à étudier analytiquement les propriétés des organismes vivants (ayant pour but de les distinguer de ce qui n'est pas vivant).

² R. Rosen, « Autobiographical Reminiscences », 2006, *Axiomathes*, 16(1-2), 1-23.

Cet aperçu de l'œuvre de Rosen restera très superficiel puisque ce qui m'intéresse dans cette présentation c'est d'introduire le sens que Rosen donne à la notion de complexité, en laissant de côté l'autre condition nécessaire du vivant ainsi que bien d'autres aspects importants de son œuvre.

Voici donc ce qu'il nous faudra pouvoir comprendre au terme de notre parcours : un système complexe est, selon Rosen, un système naturel que nous pouvons modéliser, mais dont *au moins un modèle* (il suffit d'un seul !) *n'est pas simulable*. Un tel système naturel complexe ne peut donc pas être reproduit de manière complète au moyen d'un algorithme, c'est-à-dire à l'aide d'un pur langage syntaxique linéaire. L'algorithme ne peut faire que substituer sa propre causalité efficiente (via le hardware) à celle du système naturel ; et la causalité efficiente de ce dernier doit alors être transformée en causalité matérielle pour être simulable.

Avant d'en arriver à une compréhension plus fine de cette conception de la complexité, et justement pour mieux y arriver, je vais présenter quelques autres approches. J'insisterai tout particulièrement sur celles de John von Neumann et Henri Atlan qui nous permettront de cerner certains traits fondamentaux de la « complexité » telle qu'elle se présente le plus souvent, et en même temps de pointer leurs caractéristiques communes. L'originalité de l'approche Rosenienne pourra dès lors, je l'espère, encore mieux apparaître.

3. QU'EST-CE QUE LA COMPLEXITE ?

Rosen lui-même se plaît à opposer dès qu'il le peut sa « complexité » à celle de John von Neumann :

« L'idée qu'il existe un seuil, prédicativement franchissable, entre l'animé et l'inanimé, idée qui sous-tend de différentes manières à la fois le réductionnisme et la mimesis, a probablement été articulée pour la première fois avec vigueur par John von Neumann. Il appelait cela la complexité, et il faisait valoir qu'en dessous de ce seuil, la dynamique du système ne pouvait que réduire cette complexité, mais qu'au-dessus, la complexité pourrait en fait augmenter. Les marques distinctives de cette augmentation sont les caractéristiques des systèmes vivants: la capacité de croître, se développer, se reproduire, évoluer, apprendre, et ainsi de suite. Il n'a jamais précisé comment cette complexité devait être elle-même caractérisée ou mesurée, mais intuitivement cela avait à voir avec la cardinalité et le comptage – avec nombre d'unités objectives, et d'interactions déterminées entre elles. Ainsi, la complexité était traitée comme une

propriété d'un système mesurable, observable, et chaque système avait une valeur définie de cette variable qui lui est associée à un instant donné. [...] Je préférerais de loin utiliser un mot comme *complication* plutôt que *complexité*. »³

L'analyse que fait Rosen à l'égard de l'approche optée par von Neumann pour comprendre la complexité, pourrait être appliquée à bien d'autres tentatives de définir cette notion. Relevons simplement le cas de Christoph Adami, dont l'article remarquable intitulé « What is complexity ? »⁴, ne peut passer inaperçu aux yeux des biologistes. Selon cet auteur :

« L'évolution augmente la quantité d'*informations* qu'une population recèle au sujet de sa niche (et donc, sa complexité physique). Le seul mécanisme nécessaire pour garantir une telle augmentation est la sélection naturelle. »

Adami ne réduit pourtant pas la complexité à un langage purement syntaxique tel que celui qui serait dicté par le génome des organismes vivants, et il envisage justement la complexité comme le *rapport* entre les instructions inscrites dans le langage génétique (par le biais de la sélection naturelle opérée sur le phénotype) et leur signification dans un environnement donné (la séquence d'ADN ne signifie rien sans ce rapport). Cependant, il continue à envisager la complexité – comme le font la grande majorité des biologistes – en lien avec la seule *survie* des organismes vivants :

« La complexité physique *est* l'information sur l'environnement pouvant être utilisée pour faire des prédictions à son sujet. Être capable de prédire l'environnement permet à un organisme de l'exploiter pour la survie. »⁵

Or le problème qui nous occupe est celui de la *vie*, et il n'est pas certain que cette dernière se réduise à un impératif de conservation et donc de survie. C'est pourquoi, nous nous méfions de ces conceptions de la complexité qui mesurent, calculent, quantifient, proposant ainsi une échelle de complexité – se situant généralement quelque part entre la régularité parfaite et le hasard.

Le dernier livre d'Henri Atlan (cité précédemment) donne une présentation particulièrement claire de ce paradigme de la complexité, en le mettant notamment en rapport avec la notion d'*émergence*. Une exploration des thèses principales qui y sont

³ R. Rosen, *Essays On Life Itself*, Columbia, 2000, pp. 42-43 (ma traduction).

⁴ C. Adami, « What is complexity ? », 2002, *BioEssays*, 24, 1085-1094 (ma traduction).

⁵ Ibid. (ma traduction).

contenues nous permettra d'esquisser quelques rapprochements frappant entre les idées de ce médecin biologiste et philosophe, et celles du biologiste mathématicien Robert Rosen.

Pour mener à bien cette comparaison, je vais poursuivre le cheminement déjà entamé, à savoir la caractérisation de ce qu'est la complexité. Je procéderai en quelque sorte par l'absurde, même si c'est d'une manière très peu rigoureuse, en partant de figures de la complexité qui me paraissent dominantes aujourd'hui, et en indiquant pourquoi elles manquent leur but.

La première forme dominante de complexité, que je qualifie de « quantitative », servira de préliminaire. Son importance pour notre comparaison entre Atlan et Rosen apparaîtra par la suite. La seconde forme de complexité, qui est définie par Atlan lui-même comme étant la complexité « structurale », nous introduira plus directement dans cette comparaison.

3.1. La complexité quantitative

C'est la forme de complexité qui s'appuie sur le dénombrement pour justifier le caractère « complexe ». Un grand nombre d'éléments par exemple. Mais il faudrait alors admettre que le tas de sable est complexe, ou bien qu'il y a la même complexité dans le corps que je suis présentement et dans l'amas de poussière qui restera de moi après ma mort ! Certains, dont Atlan, font plutôt référence à un grand nombre de paramètres pour caractériser la complexité. La fameuse formule « le tout est plus que la somme des parties » adopte également cette vision quantitative du complexe, vision qui a évolué en ajoutant à la somme des parties la somme des interactions entre les parties. Je fais ici référence au courant connexionniste dont les philosophes William Bechtel et Robert C. Richardson nous donnent une bonne description :

« Beaucoup de machines sont simples, composées de seulement une poignée de pièces qui interagissent très peu ou de façon linéaire. [...]. Certaines machines sont cependant beaucoup plus complexes : un composant peut affecter et être affecté par plusieurs autres, avec un effet en cascade, ou il peut y avoir des rétroactions importantes à partir de stades "postérieurs" vers des stades "antérieurs". Dans ce dernier cas, ce qui est fonctionnellement dépendant devient flou. *L'interaction* entre les composants devient critique. Les mécanismes de ce genre-ci sont des *systèmes complexes*. »⁶

⁶ W. Bechtel & R.C. Richardson, *Discovering Complexity*, 1993, Princeton, Princeton University Press, chapter two, ma traduction.

L'interactivité est devenue une caractéristique de la complexité largement acceptée dans les sciences biologiques, et tout particulièrement les sciences cognitives. On remarque qu'elle fait entrer dans le concept de complexité la notion (plus qualitative il est vrai) de « rétroaction » (*feedback*). Cette notion renvoie à une certaine forme de circularité, mais il faut pourtant être prudent et ne pas relier d'une manière trop essentielle les mécanismes de rétroaction à la complexité.

Ludwig von Bertalanffy nous éclaire sur ce point, notamment au chapitre 7 de sa *Théorie générale des systèmes*. Je présume ici que les systèmes auto-régulés dont parle cet auteur sont des systèmes complexes – von Bertalanffy n'utilise pratiquement jamais ce terme – et qu'il est donc pertinent de comprendre pourquoi la rétroaction ne forme qu'une classe *spéciale* de ces systèmes. Je le cite :

« [...] la dynamique des systèmes ouverts et les mécanismes de rétroaction sont deux modèles différents, chacun étant valable dans sa sphère. Le modèle du système ouvert est fondamentalement non mécaniste et il transcende, non seulement la thermodynamique conventionnelle, mais aussi la causalité mono-directionnelle qui est, on le sait, fondamentale en théorie physique classique. [...] Du point de vue physiologique le modèle de rétroaction intervient dans ce qu'on peut appeler les "régulations secondaires" du métabolisme (et d'autres domaines), c'est-à-dire les régulations par des mécanismes préétablis, selon des chemins fixés, comme dans le cas du contrôle neuro-hormonal. Son caractère mécaniste le fait appliquer en particulier à la physiologie des organes et des systèmes d'organes. De l'autre côté, le jeu des réactions dans les systèmes ouverts s'applique aux "régulations primaires" telles que le métabolisme cellulaire, où l'on obtient le système ouvert de régulation le plus général et le plus primitif. »⁷

Ce qu'il faut retenir de ce message, c'est que ce « système ouvert de régulation le plus général et le plus primitif » est caractérisé comme étant « fondamentalement non mécaniste », ce qui fait qu'il « transcende » ainsi « la causalité mono-directionnelle ». Ce trait de caractère pourrait, bien plus fondamentalement que la rétroaction, être rapporté à la complexité, et il n'a pas échappé à Rosen (qui fait d'ailleurs de temps en temps référence à von Bertalanffy). Nous reviendrons plus tard sur ce point essentiel.

Je clos ce paragraphe en citant Rosen qui dénonce avec force à sa manière l'interprétation quantitative de la complexité :

⁷ L. von Bertalanffy, *Théorie générale des systèmes*, Paris, Dunod, 1968, 1973 pour la traduction française de J-B. Chabrol, p. 167. Les personnes intéressées pourront (re)lire les chapitres 6 et 7 de cet important ouvrage pour préciser la portée de cette conception de la rétroaction liée à la « mécanisation » de l'organisme sous l'effet d'une sélection.

« Ainsi, la complexité des organismes, d'après le point de vue conventionnel, est interprétée comme une mesure de la façon dont ils sont spéciaux, considérés simplement comme des systèmes matériels. La complexité est mesurée dans un système en comptant le nombre d'ingrédients différents qu'il contient ainsi que les interactions qui les contraignent, c'est-à-dire en considérant à quel point il nous paraît compliqué. Ainsi, selon ce point de vue, il est générique pour les systèmes matériels de ne pas être complexe ; la plupart des systèmes matériels sont simples. [...] De telles présomptions sont extrêmement fortes. Il vaut la peine de les énoncer à nouveau. Tout d'abord, la simplicité est générique, la complexité est toujours rare. Deuxièmement, les systèmes simples, ceux qui sont génériques, sont entièrement indépendants de tout contexte. Troisièmement, le gradient allant de la simplicité à la complexité n'est le résultat que d'une accumulation de parties simples, indépendantes du contexte, et l'analyse de systèmes plus complexes est simplement une question d'inverser les accumulations qui les ont produits. »⁸

3.2. La complexité structurale.

C'est vers Henri Atlan que je me tourne à présent pour expliciter ce que l'on peut entendre par « complexité structurale », car c'est dans son dernier ouvrage (notamment) que l'on trouve cette distinction entre auto-organisation structurale et auto-organisation fonctionnelle.

Atlan se sert de cette distinction pour proposer une classification des modèles d'auto-organisation, et donc une classification de propriétés émergentes⁹. Tout comme la complexité quantitative ne serait qu'un leurre de complexité, il faut comprendre que la complexité structurale serait également une version très affaiblie de ce concept, correspondant en fait à un *degré* minimal d'auto-organisation. Il est pourtant fréquent de rencontrer des auteurs qui, parlant de la complexité ou y faisant allusion, ne quittent en réalité pas le domaine de la simplicité en se maintenant dans une perspective quantitative et/ou structurale.

⁸ R. Rosen, *Essays on Life Itself*, op. cit., pp. 35-36

⁹ Le lecteur intéressé pourra comparer et compléter cette conception de l'émergence avec celle proposée par Olivier Sartenaer dans deux articles que l'on peut lire dans des numéros antérieurs de la *Revue des Questions Scientifiques* : Tome 181, numéros 3 et 4.

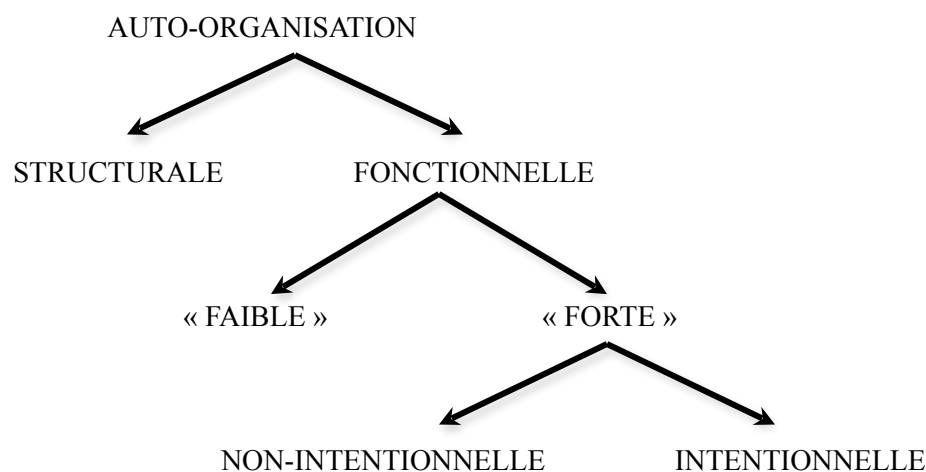


Figure 1 : Classification de l'auto-organisation d'après Henri Atlan¹⁰.

Henri Atlan envisage de faire croître le *degré* d'auto-organisation de gauche à droite sur un axe horizontal (figure 1) à mesure que les propriétés émergentes et leurs effets de signification sur l'observateur extérieur sont *moins* explicitement programmés. A gauche, du côté « structural », nous aurons tous les modèles qui ne concernent que des mécanismes d'émergence de structures, tandis qu'en se déplaçant progressivement vers la droite, nous aurons des structures émergentes pouvant présenter des fonctions émergentes elles aussi à plusieurs degrés. Il faut insister sur le fait que la montée en complexité se fait ici *progressivement*, en suivant un *gradient continu* d'émergence : structures sans fonctions → structures avec fonctions déterminées de l'extérieur du système (par le concepteur) → structures avec fonctions déterminées de l'intérieur du système lui-même. La notion de « fonction », qui a toute son importance ici, correspond chez Atlan à la « signification ».

Le modèle d'Alan Turing sur la morphogenèse par couplage de réactions chimiques et de diffusion est un exemple bien connu de complexité structurale. On peut encore citer les modèles de René Thom, Ilya Prigogine et A. Katchalsky, qui concernent tous l'apparition et le maintien de *structures* macroscopiques stationnaires

¹⁰ H. Atlan, *Le vivant post-génomique ou qu'est-ce que l'auto-organisation ?* Paris, Odile Jacob, 2011, p. 183.

parfois appelées « structures dissipatives ». Atlan classe ici aussi les modèles de Manfred Eigen et P. Schuster portant sur l'auto-organisation de la matière faisant apparaître par sélection des espèces moléculaires douées de propriétés de réplication et de catalyse chimique.

L'auteur justifie le regroupement de tous ces modèles en disant que « dans toutes ces façons d'étudier la morphogenèse, l'apparition spontanée de formes et leur complexification progressive (au moins aux yeux d'un observateur, et suivant le degré de connaissance des déterminismes qu'on lui accorde) sont le résultat d'une superposition d'effets de plusieurs facteurs qui suffit pour caractériser l'*auto-organisation structurale*. »¹¹.

Les auto-organisations fonctionnelles, d'un autre côté, sont différenciées suivant le caractère plus ou moins partiellement programmé des fonctions émergentes. Atlan donne également plusieurs exemples de modèles auto-organisationnels fonctionnels, allant des plus « faibles » – lorsque la fonction est définie a priori par le concepteur, le programmeur – aux plus « forts » – lorsque la fonction émerge du système sans avoir été prédéfinie, ce qui chez l'homme prend la forme de l'intentionnalité. L'auteur décrit minutieusement comment une émergence fonctionnelle est possible, grâce notamment à l'intervention d'une mémoire. L'ADN jouerait par exemple ce rôle de mémoire en retenant l'information nécessaire à la reproduction d'un processus donné, apparu initialement au hasard, et dont l'effet initial a acquis *après coup* la valeur de cause finale (cette conception rejoint celle de Christoph Adami présentée plus haut).

Ce critère de classification fait apparaître le rôle de la *signification* de l'information et de son origine. Rosen dirait qu'à une description purement *syntactique*, et par là fortement limitative, des phénomènes, on adjoint leur dimension *sémantique*. Pour Atlan comme pour Rosen, cet aspect sémantique permet de différencier les systèmes naturels des systèmes artificiels de conception et de fabrication humaines. Dans ces derniers, en effet, la signification est posée à l'avance, produite par le concepteur ou le constructeur de la machine. Par contre, dans les systèmes naturels, la dimension auto-organisationnelle devient « réellement complexe » en ce sens qu'elle implique une *origine interne*, non seulement pour les structures, mais pour les significations fonctionnelles des comportements produits par ces structures. La manière dont *s'origine* les significations fonctionnelles sera pourtant conçue différemment par Atlan et par Rosen, ce dernier se passant de donner un rôle fondamental au hasard (au « bruit » comme l'appelle Atlan), et substituant à la

¹¹ H. Atlan, *op. cit.*, p. 190.

« mémoire » ce qu'il appelle l'*anticipation*, à savoir le fait de posséder un modèle interne prédictif *de ses propres comportements...* et pas uniquement de son « environnement ».

Ce qu'il faut chercher à comprendre, selon Atlan, c'est comment « des structures et des fonctions complexes peuvent être produites mécaniquement à partir de contraintes physico-chimiques locales, dans certaines conditions d'observation et de mesure. »¹². C'est bien ici que le monisme spinoziste immanentiste d'Atlan ne rencontre plus la voie suivie par Rosen, pour qui les structures et fonctions complexes d'un organisme vivant *ne peuvent pas* être produites que *mécaniquement*, c'est-à-dire selon un mode de production forcément linéaire et entièrement simulable par un algorithme – aussi *compliqué* soit-il. En conclusion, il ne peut pas y avoir, d'après Rosen, de voie de continuité entre le simple et le complexe.

Ce point de divergence est fondamental, mais il n'empêche pas que la pensée de Rosen et celle d'Atlan se frôlent à certains moments clés de leur développement. Il en va ainsi au sujet de leur conception de la modélisation. Voici ce qu'écrit Atlan :

« Nous avons analysé [...] les problèmes posés par la relative non-reproductibilité des observations et par la sous-détermination plus ou moins grande des modèles par les observations, qui est peut-être la meilleure façon de caractériser la complexité des phénomènes étudiés dans la nature. »¹³

Cette caractéristique de « sous-détermination » est centrale chez Atlan qui écrit encore à son sujet :

« Ainsi, la sous-détermination des théories par les faits apparaît comme l'expression probablement la plus spectaculaire de ce qu'est la complexité naturelle en tant que limitation à notre pouvoir de théoriser. Et cela est d'autant plus frappant que cette limitation ne tient pas tant 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. Au contraire, plus on a affaire à un système complexe et singulier, plus il existe un trop grand nombre de modèles différents, mais équivalents et aussi bons les uns que les autres, sans que les observations possibles soient en nombre suffisant pour permettre, idéalement, de les réfuter tous sauf un. »¹⁴

¹² H. Atlan, *op. cit.*, p. 193.

¹³ H. Atlan, *op. cit.*, p. 272.

¹⁴ *Ibid.*, pp. 142-143.

On trouve chez Rosen une idée très proche, bien que celui-ci posera le problème différemment comme nous allons à présent le voir. En fait, Atlan reste lui aussi prisonnier d'une conception *quantitative* de la complexité : le nombre d'observations possibles, le nombre de modèles, le nombres de variables à prendre en compte, restent pour lui des critères premiers. Voici encore une citation révélatrice à cet égard :

« Et quand on s'intéresse ainsi 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.* »¹⁵

Pour Rosen, au contraire, ce n'est pas le *nombre* de modèles qui est indicatif du caractère complexe d'un système, mais bien plutôt la *nature*, simulable ou non, de ces derniers. Deux modèles peuvent suffire pour rendre compte d'un système complexe, s'il s'avère qu'aucun « dictionnaire » ne permet de traduire *complètement et de manière biunivoque* l'un dans le langage de l'autre, à savoir de réduire l'un à l'autre, ou encore de trouver un modèle *le plus grand* qui les inclurait tous les deux. La complémentarité irréductible des modèles se manifeste par le fait qu'il n'y a pas de correspondance « one to one » entre eux.

L'exemple que Rosen reprend à plusieurs reprises est celui du dualisme entre génotype et phénotype. Les phénomènes de pléiotropie (le même gène est impliqué dans plusieurs caractères phénotypiques) et de polygénie (le même caractère est associé à plusieurs gènes différents) rendent compte du fait que le vivant échappe à la métaphore de la machine impliquant la « fractionnabilité » du système et la réduction de son explication à un seul et unique modèle sensé reproduire tous les « entraînements » (les relations causales) compris dans le système naturel étudié. Je vais à présent approfondir ce point qui pourra nous faire avancer dans la compréhension de la complexité Rosenienne.

¹⁵ Ibid., pp. 138-139.

4. LA MODELISATION SELON ROBERT ROSEN

La complexité peut seulement se comprendre, chez Rosen, si on repart de sa description du processus de modélisation (Figure 2). Ce dernier est en fait un cas particulier de la simulation. Par rapport à la simulation, la modélisation tente d'encoder (*encoding*) la structure d'entraînement causal *complète* d'un système naturel (*N*). En effet, la simulation ne fait que reproduire les effets, mais convertit la causalité efficiente du système naturel en causalité matérielle du simulateur (ce dernier substituant sa propre causalité efficiente, le *hardware*).

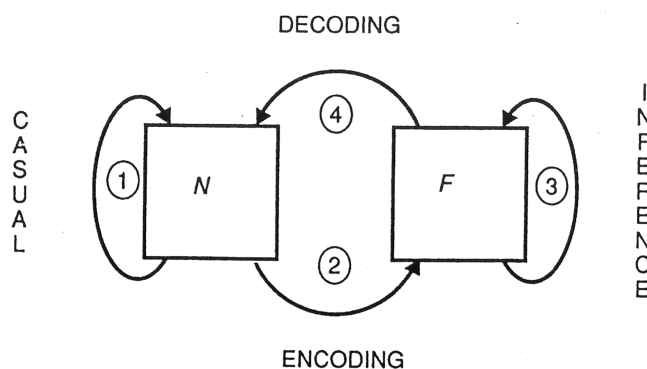


Figure 2 : Le processus de modélisation envisagé par R. Rosen (*Life Itself*, p. 60). La modélisation vise à rendre compte de la structure d'entraînement causal (1) d'un système naturel (*N*) au moyen de la structure d'entraînement inférentiel (3) d'un système formel (*F*), de telle sorte que suivre le chemin (1) – représentant le système de relations causales propre au système naturel – revienne à suivre le chemin passant par (2) (l'encodage), (3) (le système de relations inférentielles propre au système formel) et enfin par (4) (le décodage).

La situation qui nous intéresse est la suivante : nous nous retrouvons avec plusieurs modèles (posons par exemple l'existence des modèles F_1 et F_2) d'un même système naturel (*N*). Voici le commentaire que Rosen fait au sujet d'une telle situation :

« De toute évidence, les relations *formelles* entre F_1 et F_2 qui apparaissent dans cette situation portent immédiatement sur le problème du réductionnisme. Par exemple, on peut se demander, pour la classe de tous les formalismes *F* qui modélisent *N*, quelle est la structure formelle d'une telle classe ? Y a-t-il un modèle le plus grand dans cette classe ? Ou bien y a-t-il des structures d'entraînement causal (c'est-à-dire des systèmes

naturels N) dans le monde, tout comme il y en a dans le soi, pour lesquelles il n'y a pas de plus grand modèle, pour lesquelles la classe de tous les modèles formels ne détermine pas un modèle formel? »¹⁶

Au chapitre 3 des *Essays On Life Itself*, intitulé « What is Biology ? », Robert Rosen discute de l'exemple relatif à une telle situation, et que nous avons déjà évoqué. Il présente ainsi les deux manières différentes d'encoder le même système naturel Ω qu'est l'organisme vivant (voir également la figure 3) :

- Le formalisme noté B correspond à l'approche Mendélienne, à savoir au fractionnement du phénotype en caractères discrets ;
- Le formalisme noté A correspond quant à lui à l'approche moléculaire, à savoir au fractionnement du génotype en unités génétiques discrètes.

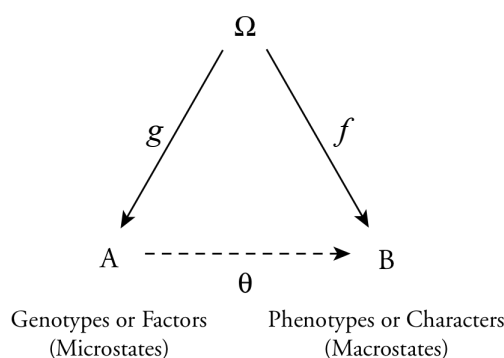


Figure 3: Modélisation d'un système naturel Ω au moyen des formalismes A (génotypes) et B (phénotypes). Voir le commentaire détaillé dans ce paragraphe.

La question essentielle qui se pose alors, et qui suffit à caractériser en profondeur ce qu'est la biologie, est de savoir s'il existe un « dictionnaire », c'est-à-dire une transformation naturelle ou encore un homomorphisme (noté θ), permettant de traduire complètement et de manière biunivoque la structure inférentielle A en

¹⁶ R. Rosen, *Life Itself*, New York, Columbia University Press, 1991, p. 64, ma traduction.

structure inférentielle B ? Autrement dit, peut-on envisager de prédire le phénotype de Ω à partir de son génotype ?

Si la flèche menant du domaine Ω au codomaine A est nommée g , et celle menant du domaine Ω au codomaine B est nommée f , le questionnement de Rosen résumé dans la citation précédente devient : le diagramme commute-t-il de telle sorte que l'on ait $f = \vartheta \circ g$?¹⁷

Si la réponse est affirmative, cela signifie qu'il existe une factorisation de l'encodage B par A , et nous avons affaire à un cas de réductionnisme : nous aurions alors *réduit* l'un des encodages à l'autre. Si la réponse est négative, les encodages sont mutuellement irréductibles et nous sommes face à un cas de complémentarité dans le sens donné à ce terme par Niels Bohr¹⁸. Il n'y a alors pas moyen de traduire *complètement* la structure inférentielle de B (par exemple le déterminisme environnemental sur les caractères) en structure inférentielle de A (le déterminisme génétique à l'égard de ces mêmes caractères). On observe dès lors une sorte de dialectique entre ces deux modèles, se manifestant par toutes sortes de relations *non* univoques entre leurs composantes, voire de contradictions : la pléiotropie et la polygénie ont déjà été citées, la dégénérescence (au sens donné par Gerald M. Edelman¹⁹) et l'exaptation (au sens donné par Stephen J. Gould et Elizabeth Vrba) seraient d'autres relations de ce type.

La tentative réductionniste, qui est bien présente dans le travail des biologistes (la théorie synthétique de l'évolution en témoigne), trouve ici une limite radicale. Alors que ces derniers supposent « par défaut » que toute relation entre le fractionnement moléculaire et le fractionnement Mendeléen *doit* procéder à partir d'une identification rigide entre les facteurs héréditaires Mendéliens et la fraction ADN, il leur faudrait accepter et tenir compte du fait que la complexité même des organismes qu'ils étudient interdit une telle supposition et une telle démarche épistémologique.

¹⁷ Ce qui se lit dans le langage de la théorie des Catégories, dont Rosen se sert pour rendre compte du processus de modélisation : suivre la flèche d'entraînement f est équivalent à suivre la flèche d'entraînement g et ensuite la flèche d'entraînement ϑ .

¹⁸ N. BOHR, « Light and Life », 1933, Nature, **131** :421-423 and 457-459.

¹⁹ Voir notre article sur le concept de dégénérescence tel qu'envisagé par Edelman et sur son importance pour rendre compte du phénomène vivant : *Revue des questions Scientifiques*, 2004, 175 (4) : 383-405.

S'il s'agit de vouloir *identifier* chaque caractère Mendeléen, visible entièrement à travers ses effets phénotypiques (via la comparaison entre un phénotype sauvage et un phénotype modifié au niveau d'un allèle), et un gène moléculaire, à savoir une caractéristique structurale intrinsèque d'une molécule (entièrement indépendante d'autres systèmes plus larges), alors il faut s'attendre à un échec (il en va de même pour la recherche d'une identification totale entre des faits mentaux et leurs corrélats cérébraux). Constat d'échec qui reflète en réalité l'échec de la tentative réductionniste et la vision « simpliste » du vivant qu'elle véhicule. Par contre, cet « échec » prend l'allure d'un progrès énorme en ce qui concerne la compréhension de la vie si l'on se place dans le mode de pensée « complexe » proposé par Rosen : les systèmes vivants sont bien plus riches en relations causales que nous l'avions présupposé, et il est à présent possible de chercher par de nouveaux moyens (pratiques mais avant tout théoriques) à mieux comprendre cette structure relationnelle causale complexe.

L'approche de la complexité ne se limiterait plus alors à sa dimension négative présente chez de nombreux auteurs. Elle ne se bornerait plus à pointer la limite de l'approche scientifique classique, limite elle-même liée aux qualités cognitives du scientifique lui-même et donc de l'être humain (un système vivant complexe parmi d'autres). Henri Atlan exprime par exemple cette approche bornée de la manière suivante :

« [...] la complexité implique une difficulté de compréhension devant un système qui n'est qu'imparfaitement connu. Très schématiquement, on peut dire que la complexité est une propriété des systèmes ou des machines dont nous ne connaissons pas les plans et dont nous ignorons la finalité fixée par leur concepteur. »²⁰

Il écrit encore :

« [...] 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 [...]. »²¹

Bechtel et Richardson écrivent quant à eux ceci à la fin de leur ouvrage déjà cité et intitulé *Discovering Complexity* :

²⁰ H. ATLAN, *op. cit.*, p. 127.

²¹ *Ibid.*, p. 135.

« [...] il y a au moins une raison de penser que la décomposition et la localisation *ne* révèlent *pas* l'organisation réelle de certains systèmes, neurophysiologiques, psychologiques, et génétiques. [...] Le point critique est que ces heuristiques, comme d'autres, reflètent des stratégies cognitives à travers lesquelles les humains abordent un problème complexe. [...] En supposant la décomposition et en recherchant une localisation directe, les scientifiques peuvent être conduits vers des modèles qui sont faciles à gérer et qui, souvent, guident la recherche vers des facteurs supplémentaires devant être expliqués par un modèle plus complet. »²²

L'optique suivie par ces auteurs diffère de celle adoptée par Robert Rosen, et cette divergence n'est d'ailleurs pas moins grande que celle relevée plus haut entre l'approche de Rosen et celle d'Henri Atlan. En témoigne ce passage :

« Nos efforts ont été dirigés par la recherche d'une explication réaliste du développement de la science. Si nous avons réussi, alors nous avons correctement caractérisé la cinématique d'une sorte de programme de recherche – celui axé sur le développement d'explications mécanistiques face à des systèmes naturels complexes. »²³

Pour Rosen, au contraire, la reconnaissance de la complexité implique de changer de direction, de stratégie, et finalement de science. Les explications mécanistiques sont *intrinsèquement* et irrévocablement insuffisantes lorsqu'il s'agit de rendre compte de systèmes naturels complexes – et qui plus est vivants !

5. DE LA COMPLEXITE À L'ONTOLOGIE (EN GUISE DE CONCLUSION)

La question qui occupe Rosen est particulièrement bien formulée dans le chapitre des *Essays On Life Itself* intitulé « Bionics Revisited » : « Où (si cela peut être quelque part) se termine la machine et débute l'organisme ? » Question à la suite de laquelle Rosen poursuit en écrivant :

²² W. BECHTEL and R.C. RICHARDSON, *Discovering Complexity*, *op. cit.*, chapitre 10, ma traduction.

²³ *Ibid.*, chap. 10, « Conclusion », ma traduction.

« La machine et l'organisme sont de nature essentiellement différente, et, en conséquence, le concept de machine n'épuise pas les dimensions de la technologie. »

Il est clair que si la simplicité caractérise la machine et que la complexité caractérise l'organisme, ce n'est pas une différence de degré, ni une différence d'ordre quantitatif, qui nous permettront de comprendre le « passage » de l'un à l'autre – si passage il y a. On aura beau dénombrer, mesurer, additionner, aucune réponse à la question posée par Rosen ne pourra être apportée.

La voie quantitative ne nous fait en réalité pas quitter d'un pouce la vision réductionniste du monde que Rosen schématise dans ce même chapitre. On y voit la physique englober toutes les réalités matérielles, tous les systèmes matériels dont font partie les machines, et dans l'ensemble des machines se trouve le sous-ensemble des organismes.

Rosen se sert de cette vision pour introduire un nouveau schéma qui, suivant toujours cette approche quantitative, tient cette fois compte de la définition que John von Neumann donne de la complexité – et que nous avons déjà vue précédemment. Dans l'ensemble des systèmes physiques on trouve à présent *un seuil quantitatif* en deçà duquel apparaissent les machines et au-delà duquel se situent les organismes. Et Rosen de souligner les conséquences d'une telle vision gradualiste :

1. *L'ontologie et l'épistémologie coïncident*, ce qui signifie que « comprendre comment quelque chose fonctionne vous indique également comment le construire, et inversement » ;
2. *Une fonction est toujours localisée dans une structure*, ce qui fait du principe (en réalité un présupposé) de fractionnabilité le moteur de toute la démarche scientifique du biologiste (voir par exemple le livre déjà cité de Bechtel et Richardson dont le sous-titre est « decomposition and localization »). L'efficacité de l'analyse réductionniste requiert absolument cette propriété : les activités fonctionnelles peuvent être spatialement ségréguées les unes des autres par des moyens artificiels sans perte de fonction.

Alors que la biologie a jusqu'à présent, et sans doute principalement pour des raisons méthodologiques, considéré le vivant comme s'il s'agissait d'une machine, et que cette science a, par exemple, étudié un oiseau en suivant le modèle de fabrication

d'un avion, Rosen invite à un radical changement de point de vue, à savoir à son complet renversement : *l'ontologie et l'épistémologie ne peuvent pas coïncider !*

Cette nouvelle approche implique de commencer par définir un système *simple* – il s'agit d'un système dont *tous* les modèles sont simulables – et un système *complexe* – un système dont *au moins un* modèle n'est pas simulable. Le monde des systèmes simples est le monde fermé des *mécanismes* auquel s'intéresse la physique contemporaine. Alors que le seuil envisagé par von Neumann pour expliquer le passage des mécanismes vers les organismes peut être franchi à l'aide d'algorithmes (idée que suit toujours Henri Atlan comme nous l'avons vu), celui que propose à présent Rosen ne le peut pas. On ne peut absolument plus à présent envisager d'aller du simple vers le complexe, et en sens inverse le passage est même difficile, précise Rosen.

C'est bien là le même type de barrière qui sépare la Théorie des Nombres et ses formalismes : comme l'a démontré Kurt Gödel, cette théorie ne peut pas être réduite à ses formalismes (à un software d'une machine de Turing), et donc ne peut pas être exprimée sous la forme d'un jeu purement syntaxique de manipulation de symboles, sans perdre une bonne part de ses vérités.

Cette barrière peut en fait être décrite par le concept mathématique d'*imprédictivité* : « quelque chose est imprédictif si il peut être défini seulement en termes d'une totalité à laquelle il doit lui-même appartenir ». Cette forme de *circularité* (d'autoréférence ou encore de cercle vicieux) est la seule qui puisse véritablement caractériser la complexité dont il est ici question. Si quelque chose est auto-référentiel de cette manière, il ne peut donc pas y avoir d'algorithme qui soit capable, ontologiquement parlant, de le construire (problème de la fabrication).

La conclusion générale de tout ceci est que les systèmes complexes (dont font partie les organismes vivants) peuvent bien avoir des modèles simples (une aile d'avion peut bien simuler une aile d'oiseau), mais il y aura toujours également certains de leurs modèles (au moins un) qui ne pourront être réalisés (simulés) par aucun système simple (aucune machine). Et Rosen de terminer ce chapitre 19 des *Essays On Life Itself* sur une note qui nous rappelle les propos d'Henri Atlan et dont je me servirai pour clore cette réflexion :

« En termes causaux, la description d'une machine doit toujours être complétée par les aspects liés à la causalité finale ; comme Aristote le soulignait il y a deux mille ans, une machine ne peut être comprise que si nous pouvons répondre aux questions *pourquoi*

ayant trait à la causalité finale. Ces questions alimentent la complexité intrinsèquement absente de la machine, sauf que la complexité se réfère maintenant à nous-mêmes en tant qu'ayant une compréhension, et non au système lui-même ainsi compris. »

Enfin, rappelons que pour les systèmes vivants, « être complexe » dans le sens qui vient d'être défini par Rosen ne suffit pas. Une autre condition nécessaire est de posséder *un certain type* d'imprédictivité, à savoir d'être auto-suffisant au niveau de la causalité efficiente.