



**HAL**  
open science

## La circularité biologique : concepts et modèles

Matteo Mossio, Leonardo Bich

► **To cite this version:**

Matteo Mossio, Leonardo Bich. La circularité biologique : concepts et modèles. Modéliser & simuler. Epistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation, tome 2, pp.137-170, 2014. hal-01137508

**HAL Id: hal-01137508**

**<https://hal.science/hal-01137508>**

Submitted on 30 Mar 2015

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License

## LA CIRCULARITE BIOLOGIQUE : CONCEPTS ET MODELES

Paru dans :

F. Varenne et al. (Eds.). *Modéliser et simuler*, tome 2, Editions Matériologiques, Paris  
[<http://www.materiologiques.com/Modeliser-simuler-Epistemologies,187>]

Matteo Mossio<sup>1</sup>, Leonardo Bich<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institut d'Histoire et Philosophie des Sciences et des Techniques (IHPST)  
CNRS/Université Paris I/ENS  
13, rue du Four, 75006 Paris, France

<sup>2</sup>IAS-Research Centre for Life, Mind and Society  
Department of Logic and Philosophy of Science  
University of the Basque Country  
Avenida de Tolosa 70, 20018, Donostia-San Sebastián, Spain

### Résumé

Ce chapitre propose un aperçu de la tradition théorique et philosophique qui, au cours des deux derniers siècles, a mis la circularité au centre de l'analyse des phénomènes biologiques. Selon cette tradition, les organismes réalisent un régime causal circulaire dans la mesure où leur existence dépend des effets de leur propre activité : les organismes biologiques s'autodéterminent. A son tour, l'autodétermination est le fondement d'un certain nombre de propriétés et dimensions biologiques, telles que l'individuation, la téléologie, la normativité ou encore la fonctionnalité. Nous montrons comment cette idée générale a fait l'objet d'une théorisation qui a pris, selon les cas, la forme d'une conceptualisation, d'une modélisation ou les deux à la fois. Nous analysons les différences principales entre les différentes contributions, en soulignant leurs qualités et faiblesses. Enfin, nous concluons en évoquant certains développements contemporains de cette tradition, ainsi que quelques pistes de recherche futures.

### Abstract

This chapter offers an overview of the theoretical and philosophical tradition that, during the last two centuries, has emphasised the central role of circularities in biological phenomena. In this tradition, organisms realise a circular causal regime insofar as their existence depends on the effects of their own activity: they determine themselves. In turn, self-determination is the grounding of several biological properties and dimensions, as individuation, teleology, normativity and functionality. We show how this general idea has been theorised sometimes through concepts, sometimes through models, and sometimes through both. We analyse the main differences between the various contributions, by emphasising their strengths and weaknesses. Lastly, we conclude by mentioning some contemporary developments, as well as some future research directions.

En biologie, il existe une tradition philosophique et théorique selon laquelle une caractéristique distinctive des organismes biologiques consiste en la nature *circulaire* de leur organisation.

Qu'entend-on par cela ? La thèse centrale est que les êtres vivants, à la différence d'autres classes de systèmes naturels, possèdent une organisation dont l'activité contribue à son propre maintien. En ce sens, non seulement le système produit des effets résultants de son activité mais, *circulairement*, ces effets maintiennent le système qui les cause. Ainsi, pour prendre un exemple intuitif et classique, les contractions rythmiques du cœur sont l'un des effets de l'organisation des mammifères; à leur tour ces contractions, en permettant la circulation du sang à travers le corps, contribuent au maintien de l'organisation. En raison de cette circularité causale, il est légitime d'affirmer que les organismes biologiques sont capables d'*autodétermination* ou, pour exprimer cela dans des termes quelque peu lapidaires, qu'ils *sont* ce qu'ils *font*.

D'une certaine manière, l'idée que les organismes biologiques s'autodéterminent est assez intuitive. Tout comme les contractions cardiaques, il semble évident que les effets fonctionnels d'un organisme contribuent à son existence, son maintien... ou son « bien-être ». En même temps, elle pose d'emblée un problème théorique et scientifique, précisément en raison du fait que l'autodétermination renvoie à une forme de circularité entre les causes et les effets à l'œuvre dans le système. Or, en première approximation, la circularité causale semble en conflit avec le principe, généralement admis dans les sciences de la nature<sup>1</sup>, selon lequel l'effet ne peut précéder temporellement la cause : on ne peut donc pas invoquer, sans clarification ou précaution, l'idée que les effets déterminent leurs propres causes. En conséquence, pour que la circularité soit admissible dans les sciences biologiques, il faut tout d'abord en fournir une caractérisation (et éventuellement une formalisation) qui soit compatible avec la conception de la causalité à l'œuvre dans la science contemporaine.

En plus de satisfaire cette exigence générale, tout cadre théorique faisant appel à la circularité devrait clarifier si – et le cas échéant, en quoi – la caractérisation choisie de circularité serait *distinctive* de l'organisation biologique. Est-il légitime d'affirmer que les organismes biologiques réalisent une forme propre de circularité causale ? Dans quel sens précis ? Aussi, toute théorisation<sup>2</sup> de la circularité biologique pose la question de sa formalisation. En fonction de la caractérisation choisie, et du fait qu'elle soit ou non conçue comme spécifique au domaine biologique, on peut en conclure que tel ou tel autre formalisme existant permet une description adéquate ; ou, au contraire, on peut estimer que l'élaboration d'un formalisme original est nécessaire.

Depuis au moins deux siècles, la circularité biologique a fait l'objet d'un grand nombre de réflexions et travaux de la part de philosophes, biologistes et mathématiciens. En effet, toutes les tentatives d'élaboration d'un cadre théorique de *l'organisation* biologique ont reconnu la centralité des capacités d'autodétermination des organismes et, en conséquence, abordé le

---

<sup>1</sup> Gerd Sommerhoff, *Analytical Biology*, Oxford University Press, London, 1950. Robert Rosen, «Organisms as Causal Systems Which Are Not Mechanisms: An Essay into the Nature of Complexity», in Rosen Robert (ed.), *Theoretical Biology and Complexity. Three Essays on the Natural Philosophy of Complex Systems*, Academic Press, Orlando, 1985.

<sup>2</sup> Dans ce chapitre, nous utilisons le terme « théorisation » dans le sens général de l'élaboration d'une caractérisation d'un système – associé à un phénomène que l'on veut expliquer, *l'explanandum* – qui entraîne une distinction entre des éléments pertinents et des éléments négligeables au vu de l'explication. La théorisation, comme on le verra, peut ensuite se faire par le moyen de concepts ou modèles. La question de la formalisation se pose essentiellement pour les théorisations qui élaborent des modèles.

thème de la circularité causale que de telles capacités supposent. De plus, depuis quelques années on assiste à la résurgence des travaux théoriques sur l'organisation biologique<sup>3</sup>, après quelques décennies de ralentissement dû, au moins en partie, à l'éclosion et succès de la Génétique et de la Biologie Moléculaire. En ce sens, non seulement le thème de la circularité biologique a une longue histoire, mais il est vraisemblable qu'il sera de plus en plus d'actualité dans les années à venir.

L'objectif de ce chapitre est, dans un premier temps, de clarifier pourquoi l'autodétermination (et donc la circularité causale) est considérée comme étant une capacité centrale de l'organisation biologique. La raison principale, comme nous le verrons (section 1), vient du fait qu'un traitement théorique adéquat de l'autodétermination permet de fonder de manière appropriée un certain nombre de propriétés et dimensions biologiques, telles que l'individuation, la téléologie, la normativité et la fonctionnalité. Ensuite, nous rappellerons succinctement quelques contributions historiques à la conceptualisation et modélisation de la circularité biologique (section 2), avant de nous concentrer sur celles qui, selon nous, constituent la base la plus féconde et prometteuse pour les investigations futures (section 3). Enfin, nous concluons (section 4) en évoquant certains développements contemporains de cette tradition, ainsi que quelques pistes de recherche futures.

## 1. Circularité et autodétermination biologique

L'intérêt philosophique et théorique pour la circularité biologique est étroitement lié, nous l'avons mentionné, à l'idée que les organismes biologiques possèdent la capacité spécifique d'autodétermination, cette dernière impliquant une circularité causale entre les causes et les effets d'une organisation. Il est donc important de clarifier les raisons pour lesquelles l'autodétermination joue un rôle fondamental dans cette tradition, et dans quel sens elle serait une caractéristique typiquement biologique.

De manière générale, l'intérêt pour la circularité s'appuie sur l'hypothèse d'un lien intrinsèque entre l'autodétermination et les dimensions propres du domaine biologique<sup>4</sup>. En particulier, nous nous focalisons ici sur des aspects tels que l'individuation, la téléologie, la normativité et la fonctionnalité. C'est *parce qu'ils* sont capables d'autodétermination – telle est l'hypothèse – que les organismes biologiques acquièrent une forme propre d'individuation et réalisent une organisation téléologique et sujette à des normes, dont les composants possèdent des fonctions. En ce sens, l'autodétermination est le fondement de l'organisation biologique en tant que telle.

Avant de poursuivre, revenons d'abord au problème général qui se pose lorsqu'on fait appel à la circularité causale, c'est-à-dire à la question de savoir si cette dernière implique une inversion temporelle entre les causes et les effets, et donc un conflit avec la conception de la causalité habituellement admise par la science. Comment la tradition théorique centrée sur l'autodétermination a-t-elle traité ce problème ? A l'exception notable de Kant (voir plus bas), il nous semble que tous les auteurs appartenant à cette tradition s'efforcent de décrire la circularité de façon compatible avec la conception scientifique de la causalité. En

---

<sup>3</sup> Stuart Kauffman, *Investigations*. New York, Oxford University Press, 2000. Kepa Ruiz-Mirazo, Juli Peretó & Alvaro Moreno, « A universal definition of life: autonomy and open-ended evolution », *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 34(3), 2004, p. 323–346.

<sup>4</sup> Francisco J. Varela, «The Creative Circle: Sketches on the Natural History of Circularity», in P. Watzlavick (ed.), *The Invented Reality*, New York, Norton Publishing, 1984, p. 309-323.

conséquence, il ne s'agit pas d'inverser temporellement les causes et les effets d'un système, car *la circularité biologique n'a pas lieu dans le temps physique*. Plutôt, elle se réalise à un niveau de description différent, qui fait abstraction de l'écoulement du temps physique. La circularité apparaît lorsqu'on considère un *réseau de relations* causales dans lequel chaque nœud n'est pas une instance temporelle particulière d'un composant, mais plutôt une entité unique, constituée par une succession d'instances, identifiée par la place qu'elle occupe dans le réseau, pour un intervalle de temps donné. Pour reprendre l'exemple utilisé plus haut, on peut affirmer que le cœur (et l'organisation dont il est un composant) est à la fois la cause et l'effet des contractions uniquement sous l'hypothèse que deux instances temporelles du cœur (respectivement la cause et l'effet des contractions) peuvent être considérées – pour des raisons qu'on ne discutera pas ici – comme étant une entité unique ayant une place spécifique dans l'organisation. Et cette entité unique, extraite du temps physique, est à la fois l'une des causes et l'un des effets de sa propre activité.

C'est dans ces termes, nous croyons, que la circularité est conçue (plus ou moins explicitement) dans cette tradition pour qu'elle soit en accord avec la structure de l'explication scientifique. En revanche, les auteurs et approches divergent quant à la détermination du niveau de description pertinent, ainsi qu'à la manière de caractériser conceptuellement et formellement le réseau de relations circulaires. Ces divergences sont cruciales car, on le verra, elles permettent de comparer les approches par rapport à leur pertinence biologique : en effet, les caractérisations de la circularité ne sont pas équivalentes, et certaines capturent mieux que d'autres la spécificité des phénomènes biologiques.

Venons-en maintenant aux raisons pour lesquelles l'autodétermination est une capacité cruciale des systèmes biologiques. De quels aspects et propriétés serait-elle le fondement ?

L'une des questions classiques en philosophie de la biologie est celle concernant les critères d'individuation des organismes<sup>5</sup>. A quelles conditions peut-on dire qu'un système est « un individu biologique »<sup>6</sup> ? La réponse donnée à cette question est importante, car elle véhicule une certaine conception théorique des phénomènes biologiques, et peut orienter le regard vers des caractéristiques fondamentales différentes et, donc, vers des ontologies différentes. Ainsi, on peut par exemple soutenir que, comme la seule théorie biologique existante est la théorie de l'évolution par sélection naturelle, toute entité sujette à sélection naturelle est un individu biologique<sup>7</sup>. A ce propos, la référence à l'autodétermination comme propriété constitutive fournit un fondement théorique alternatif de l'individuation : un individu biologique est une entité naturelle qui s'autodétermine. En particulier, toutes les entités qui contribuent à la détermination d'une organisation, et dont l'existence (et non pas juste le comportement ou l'état: on reviendra sur cet aspect crucial) dépend du maintien de cette même organisation (et réalisent par conséquent une circularité causale entre leur existence et leur activité), constituent un individu biologique. Ainsi, par exemple, un cœur et des poumons particuliers font partie d'un même individu biologique multicellulaire car d'une part ils contribuent à la détermination d'une organisation en permettant l'oxygénation du sang et sa circulation à travers le corps, et d'autre part ils existent précisément grâce au maintien de cette

---

<sup>5</sup> Stephen J. Gould, *The Structure of Evolutionary Theory*. Cambridge MA, Harvard University Press, 2002.

<sup>6</sup> Le débat philosophique établit un lien conceptuel entre le concept d'« individu » et celui d'« organisme » (David Hull, « A Matter of Individuality », *Philosophy of Science*, 45, 1978, p. 335-60.). Nous ne faisons que mentionner cette connexion ici, sans en développer les implications.

<sup>7</sup> David Hull, « A Matter of Individuality », *Philosophy of Science*, 45, 1978, p. 335-60.

organisation. Les frontières de l'individu biologique correspondent donc, dans cette perspective, aux frontières de l'autodétermination.

Au delà du problème général de l'individuation biologique, l'autodétermination fournit également un fondement d'autres dimensions caractéristiques des phénomènes biologiques. L'une d'entre elles est une implication immédiate de la circularité causale, à savoir la *téléologie*<sup>8</sup>. Comme on le sait, le langage téléologique est omniprésent en biologie : il est normal de se demander « à quoi sert » un certain trait, ou « quel est son but ou sa fonction ». En même temps, les biologistes sont très méfiants vis-à-vis du langage téléologique, précisément car la référence aux effets des traits et organes semble introduire subrepticement une dimension non mécaniste (et donc non scientifique) dans l'explication : on expliquerait la présence par les effets. La téléologie devient ainsi une dimension dont il vaut mieux se débarrasser. En revanche, les approches faisant appel à l'autodétermination reconnaissent que la téléologie est une dimension naturalisable, et donc compatible avec l'explication scientifique. Les organismes biologiques sont téléologiques dans le sens précis d'être organisés de sorte que – nous l'avons dit – leur activité possède bien un *telos* (cause finale), c'est-à-dire leur propre existence. À la question « Pourquoi le système S existe-t-il ? », il est alors légitime de répondre « Parce qu'il fait E ». En d'autres termes, la téléologie se naturalise en l'identifiant à la causalité circulaire : les conditions d'existence E du système S qui s'autodétermine constituent sa cause finale.

La naturalisation de la téléologie entraîne la naturalisation des normes. La dimension normative est aussi typique du domaine biologique, et cela bien en amont des implications éthiques et sociétales. L'activité biologique est intrinsèquement normée, dans le sens que – à la différence de tout autre système naturel – les composantes d'un organisme sont *censées* produire des effets spécifiques<sup>9</sup>. Alors que, dans la nature, les effets causaux se produisent tout simplement, en biologie ils *doivent* se produire d'une manière précise. Là aussi, la dimension normative pose un problème théorique au biologiste, dans la mesure où il n'est pas aisé de justifier l'usage d'un langage normatif dans une science qui n'étudierait que des enchaînements, aussi complexes soient-ils, de causes et effets. Or, en fondant la téléologie, la circularité causale offre une justification des normes, parce qu'elle génère un critère naturalisé pour déterminer ce que le système est « censé » faire. En particulier, l'organisation qui s'autodétermine, ainsi que toutes ses parties, *doit* produire certains effets dans le sens que, *sinon*, elle cesserait d'exister. L'activité du système devient sa propre norme, ou, plus précisément, les conditions d'existence de ses processus constitutifs deviennent la norme de son activité. Dans une organisation circulaire, le *telos* devient norme.

En dernier lieu, l'autodétermination fonde la fonction. Comme il a été souvent discuté<sup>10</sup>, la téléologie et la normativité sont deux dimensions fondamentales de la fonctionnalité biologique. Lorsqu'on affirme que la fonction du cœur est de pomper le sang (et non pas émettre un bruit dû au battement), on entend d'une part que pomper le sang est le *telos* du cœur, c'est-à-dire l'effet qui contribue à expliquer sa présence dans l'organisme et, d'autre part, que le cœur est censé pomper le sang (dans un certain intervalle de fréquences). Ainsi,

---

<sup>8</sup> Par 'téléologie' on entend le fait que le comportement ou activité d'un système soit orienté vers un but (une cause finale, un *telos*).

<sup>9</sup> Valerie G. Hardcastle, « On the normativity of functions », in A. Ariew *et al* (eds.), *Functions*. Oxford, Oxford University Press, 2002, p. 144-156.

<sup>10</sup> Voir par exemple Matteo Mossio, Cristian Saborido & Alvaro Moreno, «An Organizational Account of Biological Functions», *British Journal of Philosophy of Science*, 60(4), 2009, p. 813-841 ; Mossio. M. (2013), Qu'est-ce qu'une fonction biologique ? in J.J. Kupiec *et al*. (Eds.), *La Vie, et alors ?*, Belin, Paris, 223-236.

en tant que régime téléologique et normatif, l'autodétermination biologique naturalise également la fonction : en particulier, les effets des composants d'un système biologiques qui participent à une circularité causale sont leurs fonctions. L'organisation qui s'autodétermine est donc essentiellement fonctionnelle.

Il existe donc des liens profonds entre l'autodétermination et des dimensions fondamentales des phénomènes biologiques. Selon nous, telle est la raison pour laquelle la circularité est objet d'intérêt et étude d'une longue tradition scientifique et philosophique. Bien évidemment, cette affirmation générale n'est que le point de départ : une théorie des principes d'organisation biologique doit manier la circularité de façon adéquate, à la fois conceptuellement et formellement. Dans la section suivante, nous rappelons quelques contributions qui, au cours des deux derniers siècles, ont tenté de décrire et formaliser les propriétés essentielles de la circularité biologique. Comme on le verra, ces approches peuvent diverger sur de nombreux aspects; en même temps, elles partagent un élément essentiel, à savoir la centralité accordée à l'organisation dans toute entreprise explicative des phénomènes biologiques. En effet, c'est à l'échelle de l'organisation collective que se manifestent l'autodétermination, la circularité, et toutes les caractéristiques biologiques distinctives qu'elles engendrent et maintiennent.

## 2. Une très brève histoire de la circularité biologique

Traditionnellement<sup>11</sup> on fait remonter à Immanuel Kant la première affirmation explicite de l'autodétermination comme fondement de l'organisation biologique. Dans la *Critique de la Faculté de Juger*<sup>12</sup>, Kant analyse le lien intrinsèque qui existe entre autodétermination et dimension téléologique. A la différence des artefacts et d'autres classes de systèmes naturels, les organismes biologiques peuvent être caractérisés comme des *fins naturelles*, car capables de s'organiser par eux-mêmes, de *s'auto-organiser*<sup>13</sup>. Alors que la cause des artefacts, et de la plupart des systèmes naturels, est externe et indépendante, dans le cas des organismes biologiques elle est interne, constitutive de l'organisation qu'elle contribue à engendrer.

En ce sens, selon Kant, les organismes réalisent une finalité interne, dans laquelle la relation entre les moyens et les fins devient circulaire: non seulement les parties du système sont des moyens *pour* déterminer le tout mais, comme ils existent aussi *par* le tout, ils sont donc également des fins en elles-mêmes. De cette manière, les composants d'un organisme se produisent et maintiennent réciproquement, et sont tout à la fois cause efficiente et cause finale: la circularité est ainsi au cœur de l'autodétermination et de sa dimension téléologique. Comme l'écrit Kant :

Dans un tel produit de la nature toute partie, tout de même qu'elle n'existe que *par* toutes les autres, est aussi conçue comme existant *pour* les autres parties et *pour* le tout, c'est-à-dire en tant qu'instrument (organe); ce qui est insuffisant (en effet ce pourrait être aussi un instrument de l'art et ainsi n'être représenté comme possible qu'en tant que fin en général); on la conçoit donc comme un organe *produisant* les autres parties (et en conséquence chaque partie comme produisant les autres et réciproquement); aucun instrument de l'art ne peut être tel, mais seulement ceux de la nature, qui fournit toute la matière nécessaire aux instruments (même a ceux de l'art); ce n'est

---

<sup>11</sup> Voir Andreas Weber & Francisco J. Varela, « Life after Kant: Natural purposes and the autopoietic foundations of biological individuality », *Phenomenology and the Cognitive Sciences*, 1(2), 2002, p. 97–125.

<sup>12</sup> Immanuel Kant, *Critique de la faculté de juger*, [1790] Paris, Vrin, 1993.

<sup>13</sup> Kant est d'ailleurs le premier auteur à utiliser le terme « auto-organisation ». Nous reverrons sur ce terme dans la section 3.

qu'alors et pour cette raison seulement qu'un tel produit, en tant *qu'être organisé et s'organisant lui-même*, peut être appelé *une fin naturelle*<sup>14</sup>.

Pour les objectifs de ce chapitre, il importe de souligner que, pour Kant, l'organisme biologique, en raison de sa circularité, ne peut faire l'objet d'une science mécaniste au sens de la mécanique Newtonienne, cette dernière ayant été fondée épistémologiquement dans la *Critique de la Raison Pure*<sup>15</sup>. L'organisation biologique ne présente aucune analogie avec les phénomènes physiques, dont la causalité extrinsèque n'est pas en mesure d'expliquer par des principes purement mécaniques – c'est-à-dire par « des lois naturelles qu'aucune intention n'a ordonnées »<sup>16</sup> – leur organisation téléologique. L'organisation biologique échapperait donc à la connaissance scientifique objective, même si elle fait l'objet de jugements téléologiques réfléchissants, ayant un rôle régulateur<sup>17</sup>.

C'est avec Claude Bernard<sup>18</sup> que démarre véritablement l'investigation scientifique de l'autodétermination biologique. Sa contribution principale a consisté à développer une voie alternative aussi bien au mécanisme physicochimique qu'au vitalisme<sup>19</sup>, un monisme matérialiste capable d'aborder les aspects distinctifs du vivant de façon compatible avec l'explication scientifique.

L'approche de Bernard se fonde sur la distinction qu'il introduit entre les *lois*, communes à tous les phénomènes, et les *milieux*, les conditions limites qui déterminent les propriétés spécifiques de phénomènes distincts. Ainsi, différents milieux peuvent exprimer des phénomènes différents sans pour autant contredire les lois générales de la nature. Dans le cas particulier de la Biologie, le point de départ consiste à observer que les organismes exhibent un certain degré d'indépendance vis-à-vis leur environnement, tout en maintenant une interaction nécessaire avec celui-ci. L'idée de Bernard est de distinguer entre deux milieux, l'un extérieur, l'autre intérieur. Le premier est celui des phénomènes naturels décrits par les sciences physiques et chimiques ; le deuxième, distinct mais pas isolé du premier, est le *medium* où ont lieu les processus organiques. L'étude des phénomènes inorganiques requiert de considérer un seul milieu ; l'investigation des phénomènes biologiques, étant donné leur spécificité, suppose de tenir compte des deux<sup>20</sup>.

---

<sup>14</sup> Immanuel Kant, *Critique de la faculté de juger*, [1790] Paris, Vrin, 1993, §65: 296-297.

<sup>15</sup> Immanuel Kant *Critique de la raison pure*, [1781] Paris, Flammarion, 2001.

<sup>16</sup> Immanuel Kant, *Critique de la faculté de juger*, [1790] Paris, Vrin, 1993, §75 : 335.

<sup>17</sup> Voir à ce propos l'analyse détaillée de Perret (Nicole Perret, *Epistémologie constitutive pour les sciences du vivant. Sur la catégorie de causalité en biologie*. Thèse de doctorat de l'École Normale Supérieure, Paris, 2013, 181-188). La question de savoir s'il est légitime pour Kant d'élaborer une construction scientifique à partir du principe téléologique reste ouverte, voir les contributions dans Philippe Huneman (Ed.), *Understanding purpose: Kant and the philosophy of biology*. Rochester NY, University of Rochester Press, 2007 et dans Joan Steigerwald (Ed.), *Kantian teleology and the biological sciences. Special Issue of Studies in History and Philosophy Of The Biological and Biomedical Sciences*, 37(4), 2006.

<sup>18</sup> Claude Bernard, *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale*, Paris, Baillière, 1865; Claude Bernard, *Leçons sur les phénomènes de la vie communs aux animaux et aux végétaux*, Paris, Baillière, 1878.

<sup>19</sup> Thomas S. Hall, *Ideas of Life and Matter*. Chicago, Chicago University Press, 1968.

<sup>20</sup> Claude Bernard, *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale*, Paris, Baillière, 1865. Pour Bernard, l'argument vitaliste selon lequel les phénomènes biologiques violent les lois physicochimiques tente erronément de les décrire comme s'il existait un seul milieu, qui est extérieur. Au contraire, les lois s'appliquent de la même façon dans les deux milieux, la différence venant plutôt de conditions particulières que chacun de ces milieux réalise, et les interactions spécifiques auxquelles les objets sont sujets.



Les caractéristiques distinctives du milieu intérieur sont principalement deux<sup>21</sup>. D'une part, il permet l'autodétermination des phénomènes, car tous les composants contribuent à la détermination des conditions dans lesquelles ils existent, conditions qui sont – nous l'avons énoncé dans la section précédente – les normes de leur activité. D'autre part, le milieu intérieur maintient une « constance » (ou stabilité, dans un langage contemporain) malgré les changements qui peuvent se produire dans le milieu extérieur. Les phénomènes vitaux sont capables de compenser les variations externes par des modifications internes, ces dernières étant sujettes au but ultime, intrinsèque, de conserver le milieu intérieur.

L'organisme apparaît donc comme « activement impliqué », à la différence d'autres systèmes naturels, à maintenir son intégrité, et s'opposer à la désagrégation<sup>22</sup>. On retrouve donc chez Bernard l'idée centrale selon laquelle l'activité des composants d'un organisme biologique contribue à la stabilité du milieu intérieur qui, *circulairement*, est à son tour une condition (normative) de leur propre existence:

[...] les phénomènes physiologiques complexes sont constitués par une série de phénomènes plus simples qui se déterminent les uns les autres en s'associant ou se combinant pour un but final commun. [...] L'emblème antique qui représente la vie par un cercle formé par un serpent qui se mord la queue donne une image assez juste des choses. En effet, dans les organismes complexes, l'organisme de la vie forme bien un cercle fermé, mais un cercle qui a une tête et une queue, en ce sens que tous les phénomènes vitaux n'ont pas la même importance quoiqu'ils se fassent suite dans l'accomplissement du *circulus vitalis*<sup>23</sup>.

Parmi toutes les implications théoriques de l'autodétermination, la notion de milieu intérieur met davantage l'accent sur la dimension « systémique » des phénomènes biologiques. L'autodétermination ne peut se comprendre par l'analyse des composants pris isolément, mais par leur étude dans leur contexte spécifique, c'est-à-dire l'organisation biologique en activité, la physiologie interne de l'organisme. A partir de ce cadre général, il s'agit de mieux comprendre, et décrire, les mécanismes qui réalisent le milieu intérieur et son maintien. C'est surtout à cette deuxième tâche qu'un certain nombre d'auteurs et courants scientifiques se sont attelés au cours du 20<sup>e</sup> siècle.

Dans certains cas, ces contributions ont adopté une approche que l'on pourrait définir « par concepts », alors que dans d'autres cas la théorisation a pris la forme d'une « modélisation ». Quelle est la différence ? Même si les démarcations peuvent parfois être floues, nous considérons que les approches par concepts visent, à la manière de Kant et Bernard, à élaborer une caractérisation conceptuelle de l'autodétermination capable d'en saisir les aspects distinctifs, et la différencier de tout autre régime causal. Les approches par modèles, en revanche, caractérisent l'autodétermination en élaborant un *système formel* (le modèle) représentant le système naturel qui réalise l'autodétermination<sup>24</sup>. En particulier, le système formel spécifie des observables pertinents et les relations entre observables, l'objectif étant la correspondance entre la structure formelle obtenue et la structure causale du système naturel. Au sein du modèle, il est ensuite possible d'inférer le comportement du système à partir de

---

<sup>21</sup> Claude Bernard, *Leçons sur les phénomènes de la vie communs aux animaux et aux végétaux*, Paris, Baillière, 1878.

<sup>22</sup> William Bechtel, « Biological mechanisms: Organized to maintain autonomy », in F. Boogerd *et al.* (eds.), *Systems Biology. Philosophical Foundations*. Elsevier, Amsterdam, 2007, p. 269-302.

<sup>23</sup> Claude Bernard, *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale*, Paris, Baillière, 1865, 131.

<sup>24</sup> Nous n'abordons pas ici le vaste débat philosophique sur la notion de modèle en science (voir par exemple Michael Weisberg, *Simulation and Similarity: Using Models to Understand the World*, Oxford, Oxford University Press, 2013). Nous nous appuyons ici sur l'analyse de la modélisation développée par Rosen (1991). Pour une présentation succincte, voir : [http://www.panmere.com/?page\\_id=18](http://www.panmere.com/?page_id=18).

certaines conditions initiales : ces inférences constituent des *prédictions* sur le comportement du système naturel que l'on veut étudier.

Alors que les approches conceptuelles tâchent de clarifier « ce que c'est que » l'autodétermination, les approches par modèles tentent d'expliquer *comment* un système réalise l'autodétermination, en décrivant explicitement le régime causal à l'œuvre. Au cours du 20<sup>e</sup> siècle, il y a eu une alternance entre les deux types d'approches, même si l'on peut déceler une tendance progressive vers l'élaboration de modèles, au détriment de théorisations purement conceptuelles.

Une contribution fondamentale au développement de l'idée de « conservation » du milieu intérieur est due à Walter Cannon, qui ouvre la voie à l'étude des propriétés dites d'« homéostasie ». Par cette expression, on entend la capacité des organismes biologiques de compenser les perturbations externes à travers une action physiologique coordonnée, à son tour rendue possible par la plasticité de son milieu intérieur<sup>25</sup>. A son tour, la modélisation de l'homéostasie a été est due en grande partie à l'introduction du concept de *boucle de rétroaction (feedback)*, connu depuis l'antiquité, et élaboré notamment dans les années 30 dans des domaines différents<sup>26</sup>, tels que l'ingénierie<sup>27</sup> et la neurophysiologie<sup>28</sup>.

L'élaboration rigoureuse de l'homéostasie et des mécanismes de rétroaction est due à la Cybernétique de premier ordre<sup>29</sup>, et notamment aux travaux de Norbert Wiener<sup>30</sup> et William Ross Ashby<sup>31</sup>, qui furent suivis par une prolifération de modèles et applications. Le trait distinctif de ces modèles est de se placer à un niveau de description très général, qui se focalise sur l'organisation fonctionnelle des systèmes étudiés, organisation qui les définit en tant qu'unités intégrées. L'implication cruciale est qu'un même modèle peut être appliqué à des classes différentes de systèmes, qui partageraient le même schéma relationnel. En soi, la boucle de rétroaction est un outil général, utilisé dans la modélisation des servomécanismes<sup>32</sup>; la spécificité de la cybernétique réside précisément dans l'application de cet outil pour modéliser les mécanismes homéostatiques à l'œuvre dans le domaine biologique<sup>33</sup>.

---

<sup>25</sup> Walter B. Cannon, « Organization for Physiological Homeostasis », *Physiological Reviews*, 9(3), 1929, p. 399-431.

<sup>26</sup> Voir Warren S. McCulloch, «Recollections of the Many Sources of Cybernetics». *ASC FORUM*, 6(2), 1974, p. 5-16.

<sup>27</sup> Harold S. Black, « Stabilized Feedback Amplifiers », *Electrical Engeneering*, 53, 1934, p. 114-120.

<sup>28</sup> Rafael Lorente de Nó, «Studies on the structure of the cerebral cortex: I. The area entrorrhinalis», *Journal fuer Psychologie und Neurologie (Leipzig)*, 45, 1934, p. 381-438.

<sup>29</sup> La cybernétique de premier ordre se focalise essentiellement sur l'étude des mécanismes de contrôle communs à différents domaines, notamment ceux des artefacts et des organismes biologiques. La cybernétique de deuxième ordre, en revanche, se caractérise pour une dimension épistémologique plus marquée : en conséquence, l'intérêt central se déplace des systèmes observés vers les systèmes « qui observent » (Heinz von Foerster, *Observing Sytems*, Seaside, Intersystems, 1981).

<sup>30</sup> Norbert Wiener, *Cybernetics: or Control and Communication in the Animal and in the Machine*, Cambridge, MIT Press, 1948.

<sup>31</sup> Ross Ashby, *An Introduction to Cybernetics*, London, Chapman & Hall, 1956.

<sup>32</sup> Un servomécanisme est tout dispositif qui permet l'exécution d'une commande, en faisant la jonction entre cette dernière et des opérateurs.

<sup>33</sup> Leonardo Bich & Luisa Damiano, «Order in the nothing: Autopoiesis and the organizational characterization of the living», *Electronic Journal of Theoretical Physics*, 4 (16), 2008, p. 343-373, développent une analyse

Qu'est-ce une boucle de rétroaction ? Dans le modèle de Wiener, il s'agit d'une relation causale entre un *capteur* et un *effecteur*, contrôlée par un *régulateur* capable d'agir sur l'effecteur à partir d'une déviation perturbatrice détectée par le capteur, de sorte à activer une action compensatrice<sup>34</sup>. A son tour, l'action compensatrice modifie l'environnement qui a causé la perturbation, en créant ainsi une boucle (qui inclut donc l'environnement) entre l'état du capteur et celui de l'effecteur. Un mécanisme composé par une ou plusieurs boucles de rétroaction est homéostatique lorsqu'il maintient une variable – comme la température ou le pH – constante (ou à l'intérieur d'un intervalle donné).

L'approche cybernétique a le mérite certain de proposer un modèle explicite de la circularité causale telle qu'elle pourrait être à l'œuvre dans l'autodétermination biologique. Néanmoins, nous voudrions mettre en avant un certain nombre de faiblesses théoriques, étroitement liées entre elles.

Tout d'abord, le mécanisme décrit par Wiener est un mécanisme homéostatique, de stabilisation. En ce sens, il ne constitue pas le régime d'autodétermination en tant que tel, mais plutôt une capacité particulière, celle consistant à compenser des perturbations environnementales. En d'autres termes, la capacité d'homéostasie *présuppose* l'existence d'un système dont l'organisation doit, dans certaines circonstances, être maintenue stable. Ainsi, la circularité des boucles de rétroactions est propre à un certain nombre de sous-systèmes de l'organisme, mais non pas constitutive de l'autodétermination de ce dernier.

Ensuite, comme nous l'avons mentionné, les modèles des mécanismes homéostatiques sont un outil formel général, utilisable en principe pour décrire les capacités de stabilisation d'un large spectre de systèmes, naturels et artificiels. Son application au domaine biologique devrait précisément s'accompagner d'une clarification du lien entre homéostasie et autodétermination, et notamment le fait que, dans les organismes biologiques, les composants impliqués dans les boucles de rétroactions sont produits et maintenus *par* l'organisation qu'ils contribuent à stabiliser. Or, la cybernétique de premier ordre n'a pas théorisé ce point capital – la dimension « générative » propre à l'homéostasie biologique – et ne parvient donc pas à saisir l'aspect le plus distinctif de la rétroaction, lorsqu'elle est réalisée dans le domaine biologique<sup>35</sup>.

Cette faiblesse a une conséquence majeure : la modélisation cybernétique de la circularité biologique ne capture pas adéquatement, selon nous, la dimension téléologique du vivant. Techniquement, le « but » d'un mécanisme homéostatique est représenté par l'intervalle dans lequel il maintient les variables cible. Dans un artefact, cet intervalle est établi par le concepteur/constructeur externe à travers les fonctions de transfert qui définissent chaque composant, et n'a pas de lien inhérent avec les conditions d'existence du système. Chez le vivant, en revanche, la notion kantienne de finalité interne trouve ici une application claire : l'intervalle est défini en relation à une cause finale interne, qui est l'autodétermination même de l'organisme. En occultant le lien intrinsèque entre autodétermination et homéostasie, la

---

détaillée de la généalogie des concepts de 'organisation' et 'clôture' (voir section 3) dans la tradition systémique et cybernétique.

<sup>34</sup> Il s'agit ici d'une boucle de rétroaction négative, qui amortit la perturbation. La boucle positive, en revanche, amplifie les effets de la perturbation.

<sup>35</sup> Il est à noter qu'un certain nombre d'auteurs défendent encore aujourd'hui une conception cybernétique du vivant. Tsolokov (Sergey Tsokolov, «A Theory of Circular Organization and Negative Feedback: Defining Life in a Cybernetic Context», *Astrobiology*, 10(10), 2010, p. 1031-1042), par exemple, considère que les boucles de rétroaction constituent bien l'élément pivot des phénomènes biologiques, et permettent notamment de discriminer ces derniers des processus d'auto-organisation physique (voir plus bas).

cybernétique de premier ordre ne peut donc pas saisir une des dimensions cruciales de la circularité *spécifiquement* biologique. Il est important de remarquer que, selon les cybernéticiens<sup>36</sup>, un mécanisme homéostatique possède bien une finalité intrinsèque, qui est l'état final vers lequel le système tend à se stabiliser. Comme Jonas<sup>37</sup> l'a souligné, toutefois, il s'agit d'une erreur conceptuelle, qui confond le fait d'« atteindre un but » et « avoir un but ». La circularité de l'homéostasie peut atteindre un but, sans nécessairement en avoir un. Par conséquent, elle n'est pas suffisante pour décrire l'autodétermination biologique, et fonder ses dimensions distinctives : l'absence d'enracinement du modèle dans l'organisation biologique révèle ici ses limites fondamentales.

Le modèle de la circularité fondé sur les boucles de rétroaction a été repris et développé dans la tradition systémique au sein de l'embryologie. Ici, le modèle est exprimé en termes de « canalisation », davantage ancré dans l'organisation métabolique des organismes, et vise à rendre compte de la stabilisation des *processus* biologiques, plutôt que du maintien de *variables* constantes. Comme l'explique Waddington<sup>38</sup>:

« Phenomena involving the holding constant of some parameters of a physiological situation (e.g. the oxygen tension or pH of the blood) have been well known for a long time. The situation is usually referred to as one of 'homeostasis'. We are here dealing with a similar concept, but of a rather more general nature, in that the thing that is being held constant is not a single parameter but is a time-extended course of change, that is to say, a trajectory. The situation can therefore be referred to as one of homeorhesis, i.e. a stabilized flow rather than stabilized state ».

« Les phénomènes impliqués dans le maintien de certains paramètres d'une situation physiologique (par exemple la pression partielle de l'oxygène ou le pH du sang) sont bien connus depuis longtemps. On désigne généralement une telle situation 'homéostatique'. Nous avons à faire ici à un concept similaire, mais d'une nature plus générale, en ceci que la chose qui est maintenue constante n'est pas un paramètre individuel, mais plutôt une évolution étendue dans le temps, c'est à dire une trajectoire. On peut par conséquent qualifier cette situation d'homéorhétique, c'est à dire un flux stabilisé plutôt qu'un état stabilisé ».

Les embryologistes systémiques, comme Paul Weiss, décrivent un réseau clos de processus, dans lequel chaque élément est connecté aux autres de sorte qu'une déviation locale entraîne une réaction compensatoire du réseau global. De plus, ils mettent l'accent sur l'interdépendance des composants et processus qui constituent l'être vivant : chacun contribue non seulement à l'activité, mais également au maintien de tous les autres. On obtient ainsi une unité collective<sup>39</sup> dotée d'une stabilité plus forte que celle de ses constituants pris isolément<sup>40</sup>. Il est important de mentionner que, dans les années '30, Ludwig von Bertalanffy<sup>41</sup> développe

---

<sup>36</sup> Arturo Rosenblueth, Norbert Wiener & Julian Bigelow, «Behaviour, Purpose and Teleology», *Philosophy of Science*, 10 (1), 1943, p. 18-24.

<sup>37</sup> Hans Jonas, « A Critique of Cybernetics », *Social Research*, 20, 1953, p. 172-192.

<sup>38</sup> Conrad H. Waddington, «The basic ideas of biology», in C. H. Waddington (ed.), *Towards a theoretical biology: Vol.1 Prolegomena*, New York, Atheneum, 1968, p. 12.

<sup>39</sup> Paul Weiss, «The cell as unit», *ICSU REVIEW*, 5, 1963, p. 185-193.

<sup>40</sup> Paul Weiss, «The Living System: Determinism Stratified», in A. Koestler & J. R. Smythies (eds.), *Beyond Reductionism: The Alpbach Symposium*. London, Hutchinson & Co., 1969, p. 3-55.

<sup>41</sup> Ludwig von Bertalanffy, *Das Biologische Weltbild: Die Stellung des Lebens in Natur und Wissenschaft*, Bern, Francke, 1949.

une théorie des systèmes thermodynamiquement ouverts<sup>42</sup>, qui reprend un certain nombre d'éléments conceptuels de l'embryologie de Waddington et Weiss. En particulier, il élabore l'idée de réseaux moléculaires capables d'engendrer des unités supramoléculaires intégrées qui soient à la fois stables et thermodynamiquement ouvertes. Dans certaines circonstances, ces systèmes sont capables d'exhiber une dynamique circulaire qui, bien que minimalement, possède des propriétés analogues à celles des organismes biologiques. En particulier, comme on le verra, ces « structures dissipatives » maintiennent *par elles-mêmes* une unité fondamentale sur la base d'un échange continu d'énergie et matière avec l'environnement.

L'œuvre de Jean Piaget représente une étape cruciale dans l'histoire des modèles de la circularité biologique. En allant au-delà du contexte de l'embryologie, Piaget élabore une approche conceptuelle générale qui vise explicitement à cerner les *spécificités* de l'autodétermination biologique, par la jonction théorique entre circularité, autodétermination et dimension thermodynamique. En particulier, il développe un concept théorique fondamental dans cette tradition, celui de « clôture organisationnelle » (sur lequel on reviendra abondamment dans la section suivante), entendu comme complémentaire à celui d'ouverture thermodynamique de von Bertalanffy<sup>43</sup>. L'objectif de Piaget est de rendre compatible l'idée d'un flux constant de matière et énergie entre l'organisme et l'environnement avec celle d'un ordre circulaire constitutif, qui maintient le système au cours du temps. Le concept de clôture de Piaget décrit la dynamique propre du vivant comme une forme d'autodétermination, dans le sens fondamental d'une connexion entre *activité* et *existence*, réalisée par un réseau circulaire de relations entre les composants de l'organisme, dont dépendent son unité et individuation.

La distinction entre clôture organisationnelle et ouverture thermodynamique est le pivot théorique sur lequel les élaborations plus récentes de l'autodétermination biologique s'appuieront, plus ou moins explicitement. Cela vaut non seulement par rapport à la relation profonde entre stabilité de l'organisation et variations des processus sous-jacents, mais également en relation avec les interactions adaptatives de l'organisme avec l'environnement. Sur ce point, Piaget réinterprète et généralise les concepts d'assimilation et adaptation – initialement formulés par l'embryologie de Waddington – et décrit les interactions d'un organisme avec l'environnement en termes d'adaptation, conçue comme une assimilation des perturbations qui induit une « autorégulation » interne (accommodation). Ainsi, l'organisation adapte le réseau circulaire de relations en fonction des perturbations, tout en maintenant la clôture qui réalise l'autodétermination<sup>44</sup>.

### 3. Circularité et clôture

A partir des travaux de Piaget, l'élaboration théorique de l'autodétermination biologique entre dans une nouvelle phase, qui s'étend sur les quatre dernières décennies. Les approches développées pendant ce laps de temps partagent non seulement l'objectif de caractériser la circularité de manière scientifiquement acceptable, mais aussi celui de capturer des propriétés

---

<sup>42</sup> Dans la section suivante, nous reviendrons sur la formalisation des systèmes loin de l'équilibre thermodynamique développée par Prigogine et ses collaborateurs dans les années 70 (Gregoire Nicolis & Ilya Prigogine, *Self-organization in nonequilibrium systems: From dissipative structures to order through fluctuations*, New York, Wiley, 1977; Ilya Prigogine & Isabelle Stengers, *La Nouvelle Alliance. Métamorphose de la science*, Paris, Gallimard, 1979)

<sup>43</sup> Jean Piaget, *Biologie et connaissance*, Paris, Gallimard, 1967.

<sup>44</sup> Jean Piaget, *Biologie et connaissance*, Paris, Gallimard, 1967.

*distinctives* de l'organisation biologique. Leur ambition est donc de s'appliquer *exclusivement* aux phénomènes biologiques. Le concept pivot de cet ensemble d'approches est celui de clôture (organisationnelle)<sup>45</sup>. Dans cette section, nous allons donc nous concentrer sur la façon dont celui-ci a été pensé et, dans certains cas, formalisé et modélisé par les différents auteurs.

### 3.1. Autopoïèse

L'approche la plus connue est sans doute celle centrée sur le concept d'*autopoïèse*<sup>46</sup>, développé par Humberto Maturana et Francisco Varela<sup>47</sup>. Son objectif central, comme les auteurs l'ont explicitement affirmé, est de fournir des critères théoriques d'identification d'un système biologique, de sorte à échapper à une énumération plus ou moins longue et pertinente de caractéristiques. Le point de départ de Maturana et Varela est ce que nous appelons ici l'autodétermination comme pivot central de l'identité biologique : toutes les propriétés spécifiques des organismes biologiques dépendent du fait que leur organisation se détermine par soi-même, que son existence dépend de son activité.

L'originalité du concept d'autopoïèse consiste en le fait de décrire l'autodétermination en spécifiant la façon dont elle se réalise dans les organismes. Selon la définition de Varela<sup>48</sup> :

Un système autopoïétique est organisé comme un réseau de processus de production de composants qui

(a) régénèrent continuellement par leurs transformations et leurs interactions le réseau qui les a produits, et qui

(b) constituent le système en tant qu'unité concrète dans l'espace où il existe, en spécifiant le domaine topologique où il se réalise comme réseau.

L'autopoïèse est une interprétation particulière de ce que Piaget avait nommé « clôture organisationnelle », à savoir un régime causal circulaire dans lequel un ensemble de composants sont à la fois causes et effets du réseau d'interactions qu'ils constituent. En quoi est-elle particulière ? L'autopoïèse est conçue comme un régime spécifiquement biologique, et inclut trois aspects distinctifs : production, délimitation et interaction. Regardons cela d'un peu plus près.

En premier lieu, l'autopoïèse interprète de la façon la plus fondamentale l'idée que le système « est ce qu'il fait » : l'organisation biologique s'autodétermine dans le sens qu'elle *régénère* ses propres composants fonctionnels. A la différence des artefacts, la circularité causale biologique inclut des mécanismes de production matérielle (sous la forme de réparation, de réplication ou autre), et non pas simplement des capacités de maintien d'une organisation dont

---

<sup>45</sup> Voir Matteo Mossio, « Closure, causal », in W. Dubitzky et al. (Eds.), *Encyclopedia of Systems Biology*, New York, Springer, 2013, p. 415-418.

<sup>46</sup> Le terme « *autopoïèse* » a été initialement introduit par Canguilhem (Georges Canguilhem, *La connaissance de la vie*, Paris, Librairie Philosophique Vrin, 1965) pour tracer une frontière entre la nature "créative" des systèmes biologiques et la logique "technique" ("hétéropoïétique") de l'expérimentation, dont la méthode et justification sont externes aux systèmes étudiés.

<sup>47</sup> Humberto Maturana & Francisco J. Varela, *De Máquinas y Seres Vivos: Una teoría sobre la organización biológica*, Santiago de Chile, Editorial Universitaria, 1973; Francisco J. Varela, Humberto Maturana & Ricardo Uribe, «Autopoiesis: The organization of living systems, its characterization and a model», *Biosystems*, 5, 1974, p. 187-196.

<sup>48</sup> Francisco J. Varela, *Autonomie et connaissance*, Seuil, Paris, 1989, p.45, qui reprend l'originale de 1973.

les composants fonctionnels seraient préexistants. Dans la terminologie de Varela, ce point est capturé par la distinction entre deux types de clôture : opérationnelle et organisationnelle. La clôture *opérationnelle* a une origine algébrique<sup>49</sup>, n'est pas spécifiquement biologique, et fait généralement référence à la récursivité entre les opérations des composants d'un système : toutes les actions des composants ont un effet dans le système. La clôture *organisationnelle*, en revanche, n'est pas uniquement un réseau d'opérations récursives mais, de plus, requiert une « dépendance générative » entre les composants<sup>50</sup>, dont l'existence même (et non seulement leur état particulier) dépend de leurs interactions réciproques dans le réseau<sup>51</sup>. Dans ce sens, l'autopoïèse, en réalisant la clôture organisationnelle, engendre une circularité telle que les effets de l'activité d'un système (et de ses composants) contribuent à déterminer les conditions d'existence de ce même système (et de ses composants).

Deuxièmement, l'autopoïèse entraîne la réalisation d'une unité topologique : l'organisation circulaire engendre une frontière physique, qui permet de délimiter l'unité biologique dans l'espace physique<sup>52</sup>. La frontière est distinctive de l'autodétermination biologique : elle délimite théoriquement le *milieu intérieur*, non pas arbitrairement ou par l'extérieur, mais par les processus constitutifs de l'organisation elle-même.

Troisièmement, l'autopoïèse inclut des capacités d'interaction avec l'environnement. A travers sa frontière, l'organisation autopoïétique maintient un flux constant (entrant et sortant) de matière et énergie avec l'environnement, flux qui est une condition nécessaire pour l'autodétermination. A ce propos, Maturana et Varela acceptent et reprennent ici l'idée de la complémentarité entre clôture organisationnelle et ouverture thermodynamique, pour affirmer que l'autopoïèse n'a rien à voir avec l'« indépendance » du système : l'organisation autopoïétique est intrinsèquement interactive<sup>53</sup>.

L'élaboration du concept d'autopoïèse constitue une étape majeure dans la tradition centrée sur l'autodétermination biologique. A la différence des approches cybernétiques, la circularité est conceptualisée (et puis, comme on verra plus bas, modélisée) de sorte à capturer l'essence

---

<sup>49</sup> «A domain K has closure if all operations defined in it remain within the same domain. The operation of a system has therefore closure, if the results of its action remain within the system» (Paul Bourguin & Francisco J. Varela, *Toward a Practice of Autonomous Systems*, MIT Press/Bradford Books, Cambridge MA, 1992.xii).

<sup>50</sup> Voir Francisco J. Varela, *Autonomie et connaissance*, Seuil, Paris, 1989 et Jorge Soto-Andrade & Francisco J. Varela, « Self-Reference and fixed points: A discussion and an extension of Lawvere's theorem », *Acta Applicandae Mathematicae*, 2, 1984, p. 1-19 pour des tentatives de formalisation de la clôture organisationnelle qui explorent la possibilité d'exprimer la dépendance générative par des fonctions récursives, ou Francisco J. Varela, «A Calculus For Self-Reference», *International Journal of General Systems*, 2, p. 5-24, 1975 par des outils empruntés du calcul des indicateurs de Spencer Brown (George Spencer Brown, *Laws of Form*, London, George Allen and Unwin Ltd, 1969).

<sup>51</sup> Les relations conceptuelles entre autopoïèse et clôture organisationnelle ne sont pas tout à fait claires dans l'œuvre de Varela. Varela semble considérer que la clôture organisationnelle est un concept plus général que l'autopoïèse, et donc peut-être applicable à d'autres niveaux que le cas typique de la cellule. En pratique, toutefois, les définitions et utilisations des deux concepts se superposent largement.

<sup>52</sup> Typiquement, mais pas nécessairement, la frontière se réalise sous la forme d'une membrane, comme c'est le cas pour les organismes unicellulaires. Voir aussi Paul Bourguin & John Stewart, « Autopoiesis and Cognition ». *Artificial Life*, 10, 2004, p. 327-345 pour une analyse et un développement.

<sup>53</sup> Par rapport à Piaget, Maturana & Varela ont mis beaucoup moins d'emphase sur la dimension interactive de l'organisation biologique. Leur élaboration se concentre essentiellement sur l'idée de « couplage structurel » (Humberto Maturana & Francisco J. Varela, *El árbol del conocimiento*, Santiago de Chile, Editorial Universitaria, 1984) entre, notamment, l'organisme et l'environnement, sans développer les aspects liés à l'adaptivité et au contrôle des interactions. Sur ce point, voir Michel Bitbol & Pier Luigi Luisi, « Autopoiesis with or without cognition: Defining life at its edge ». *Journal of the Royal Society Interface*, 1, 1993, p. 99-107.

de l'organisation biologique, et non pas tel ou tel autre aspect particulier<sup>54</sup>. Ce qui doit être conservé et maintenu par le réseau clos d'opérations ne sont pas des aspects, états ou processus du système (comme dans le cas de l'homéostasie ou de l'homéorhésie), *mais le système autopoïétique lui-même*, en tant qu'unité organisée. Entre autres choses, cette posture centrale implique l'idée que l'organisation autopoïétique constitue l'*invariant fondamental* de la phénoménologie biologique. Malgré les innombrables variations qu'elle subit – variations qui peuvent radicalement changer ses propriétés – l'organisation biologique maintient toujours l'autopoïèse à travers le temps ontogénétique et phylogénétique.

Pour ces raisons, Maturana et Varela tracent une distinction conceptuelle nette entre l'autopoïèse et l'auto-organisation. Il est ici important de clarifier que, après son introduction par Kant, l'utilisation du concept d'auto-organisation a évolué et, dans son acception technique contemporaine, fait référence à une classe de phénomènes physiques dits « structures dissipatives »<sup>55</sup>. Des systèmes physiques très variés, comme des cellules de Bénard, des flammes, des ouragans ou encore des réactions chimiques oscillatoires sont autant d'exemples de structures dissipatives. Les structures dissipatives sont des phénomènes tels qu'un grand nombre d'éléments microscopiques adopte une configuration globale macroscopique ordonnée (« une structure ») en présence d'un flux spécifique d'énergie et matière, dans des conditions loin de l'équilibre thermodynamique. En retour, comme certains auteurs l'ont souligné<sup>56</sup>, la structure macroscopique exerce une contrainte qui contribue à maintenir les conditions limites requises pour le maintien du flux d'énergie et matière. Ainsi, il semble légitime de décrire les structures dissipatives comme des systèmes dans lesquels une forme de circularité causale est à l'œuvre : les dynamiques microscopiques engendrent une structure macroscopique, et la structure détermine (du moins en partie) les dynamiques microscopiques (en agissant sur leur conditions limites). En ce sens, l'auto-organisation est une forme d'autodétermination, tout comme la clôture organisationnelle des systèmes biologiques.

Y a-t-il donc une similitude fondamentale entre les deux classes de systèmes ? Selon Maturana et Varela, ce n'est pas le cas. En effet, l'affirmation selon laquelle l'autopoïèse est l'invariant fondamental du vivant, ce qui est maintenu et transmis au fil du temps, est en contradiction avec l'idée que l'organisation autopoïétique s'auto-organiserait, dans le sens de se *générer par elle-même*. Les organismes biologiques – nous l'avons vu – maintiennent et régénèrent leurs composants sujets à clôture ; mais ils ne génèrent pas leur organisation autopoïétique en tant que telle, qui est plutôt conservée (avec modifications) au cours du temps<sup>57</sup>. En revanche, le concept technique d'auto-organisation s'applique précisément à des

---

<sup>54</sup> Il est important de souligner que Maturana et Varela ont explicitement manifesté une certaine méfiance, voire rejet, vis-à-vis concepts tels que la téléologie, la normativité, la fonction, etc..., qui auraient, selon eux, un rôle purement heuristique. Au contraire nous pensons (voir section 1) que l'un des mérites majeures de ces approches, y compris celle de l'autopoïèse, est précisément qu'elle fournissent un fondement naturalisé de ces dimensions.

<sup>55</sup> Paul Glansdorff & Ilya Prigogine, *Thermodynamics of structure, stability and fluctuations*. London, Wiley, 1971. Gregoire Nicolis & Ilya Prigogine, *Self-organization in nonequilibrium systems: From dissipative structures to order through fluctuations*, New York, Wiley, 1977.

<sup>56</sup> Mark H. Bickhard, Representational Content in Humans and Machines. *Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence*, 5, 1993, p. 285-333. Kepa Ruiz-Mirazo, *Physical conditions for the appearance of autonomous systems with open-ended evolutionary capacities*, thèse de doctorat, Universidad del Pais Vasco, Donostia-San Sebastian, 2001.

<sup>57</sup> Ce qui veut dire, en particulier, que la question concernant les *origines* de l'organisation biologique est distincte, bien que connectée, à celle concernant sa *nature* autopoïétique.



systèmes physiques et chimiques spontanés, capables de se générer par eux-mêmes (à la condition, bien sûr que certaines conditions limites soient vérifiées). Il y a donc une différence profonde et radicale entre les deux classes de systèmes naturels, et la nature des régimes causaux circulaires qu'ils réalisent<sup>58</sup>. L'autopoïèse est donc conceptuellement distincte de l'auto-organisation. Ironie du sort, c'est donc l'un des modèles les plus proches de l'inspiration kantienne originale qui rejette le terme introduit par Kant pour désigner l'autodétermination biologique<sup>59</sup>.

Malgré ses mérites, que nous avons rapidement et partiellement évoqué ici, le concept d'autopoïèse présente un certain nombre de faiblesses théoriques. Celle sur laquelle nous nous concentrons ici consiste en ceci, qu'il ne détaille pas de quelle façon les organismes biologiques réalisent la clôture organisationnelle : sur ce point, Maturana et Varela restent plutôt vagues. Nous avons vu que l'autopoïèse se fonde sur la distinction entre clôture organisationnelle et ouverture thermodynamique ; pourtant, faute d'une description précise de la clôture, il est difficile de savoir comment l'organisme articule les deux dimensions, quelles entités sont sujettes à clôture et, surtout, à quel niveau de description cette dernière se réalise. L'une des conséquences de ces imprécisions<sup>60</sup> est que la définition d'autopoïèse ne semble pas être suffisamment précise pour pouvoir exclure théoriquement son application à des systèmes naturels non biologiques réalisant des cycles de processus, comme par exemple le cycle hydrogéologique.

La clôture selon Maturana et Varela semble donc souffrir d'une théorisation insuffisante, qui est incapable d'en capturer les caractéristiques distinctives. L'un des signes de ce manque est que les tentatives de modélisation faites semblent somme toute peu concluantes. Maturana et Varela ont bien sûr proposé des modèles formels explicites, en s'appuyant sur des outils physicochimiques, computationnels et cybernétiques. L'un des exemples les plus connus est le modèle informatique d'un système autopoïétique basé sur les automates cellulaires<sup>61</sup>. D'autres travaux ont utilisé des formalismes censés mieux capturer les traits distinctifs de l'autodétermination biologique<sup>62</sup>, sans pour autant réussir – malgré les intentions – à aller au-delà d'une modélisation de propriétés globales (et donc *non* spécifiques) de circularité. Ces implémentations computationnelles, enfin, n'étant pas conçues pour établir une correspondance entre leur structure formelle et la structure causale du système naturel, semblent remplir une fonction d'illustration, plutôt que de modélisation, de l'importance de la membrane pour la caractérisation topologique du système. De plus, elles n'abordent pas

---

<sup>58</sup> Dans la section suivante, nous mentionnerons une autre différence importante, lors de la discussion du modèle de Rosen.

<sup>59</sup> Dans la section suivante, on verra qu'il existe une autre différence majeure entre auto-organisation et organisation biologique (dont Maturana est lui-même conscient, voir Humberto Maturana, «Autopoiesis», in M. Zeleny (ed.) *Autopoiesis. A Theory of Living Organization*, New York, North Holland, 1981, p. : 30), à savoir le fait que, dans un sens précis qu'on expliquera, les structures dissipatives ne réalisent pas d'*organisation*.

<sup>60</sup> Voir aussi Alvaro Moreno & Matteo Mossio, *Biological autonomy: a philosophical and theoretical enquiry*, Dordrecht, Springer (à paraître).

<sup>61</sup> Francisco J. Varela, Humberto Maturana & Ricardo Uribe, «Autopoiesis: The organization of living systems, its characterization and a model», *Biosystems*, 5, 1974, p. 187-196. Barry McMullin & Francisco J. Varela, «Rediscovering Computational Autopoiesis», in P. Husbands, I. Harvey, *Fourth European Conference on Artificial Life*, Cambridge MA, MIT Press, 1997, p. 38-47.

<sup>62</sup> Francisco J. Varela, «A Calculus For Self-Reference», *International Journal of General Systems*, 2, p. 5-24, 1975. Francisco J. Varela, *Principles of Biological Autonomy*, New York, Elsevier North Holland, 1979. Francisco J. Varela, *Autonomie et connaissance*, Seuil, Paris, 1989.

l'autodétermination, en se limitant à montrer des processus d'auto-assemblage et de formation de patrons.

La circularité biologique, dans la forme spécifique de clôture organisationnelle, requiert donc une conceptualisation et une modélisation plus rigoureuse. L'œuvre de Rosen apporte une contribution majeure et substantielle à cet objectif.

### 3.2. *(M,R)*-systems

Pour introduire la figure de Robert Rosen, il est instructif de présenter deux auteurs qui ont eu une influence forte sur sa trajectoire scientifique et intellectuelle. Tout d'abord, Rosen a été l'élève de Nicolas Rashevsky, qui avait consacré la première partie de sa carrière scientifique, à partir des années 30, à la biophysique, en modélisant notamment des phénomènes biologiques locaux, tels que les processus de diffusion ou les réseaux de neurones<sup>63</sup>. Un changement de perspective radical intervient ensuite : dans l'article "*Topology and Life*" (1954)<sup>64</sup> Rashevsky prône le passage de la biophysique à ce qu'il appelle la « biologie relationnelle », c'est-à-dire à une approche centrée sur les propriétés relationnelles des organismes, sur les relations entre composants qui constituent leur organisation. Alors que les phénomènes physiques, selon Rashevsky, sont essentiellement caractérisés par leurs propriétés métriques, ce qui compte pour les phénomènes biologiques ce sont plutôt les aspects relationnels : la biologie est donc une science en quête du

principe qui connecte les différents phénomènes physiques impliqués et exprime l'unité biologique de l'organisme, et du monde organique comme un tout »<sup>65</sup>.

La biologie théorique de Rosen s'inscrit pleinement dans cette vision, et élabore un cadre fortement et explicitement axé sur la théorisation des principes d'organisation, et donc sur la nature des relations entre les composants d'un organisme en tant qu'unité intégrée.

L'autre influence théorique que nous mentionnons ici est celle de Howard Pattee. Collègue et collaborateur de Rosen à partir du début des années 70, il partage avec lui, entre autres choses, un intérêt pour une biologie théorique se penchant sur « la nature de la vie »<sup>66</sup> et les propriétés distinctives de l'organisation biologique. Parmi ses nombreuses contributions<sup>67</sup>, la plus pertinente vis-à-vis l'œuvre de Rosen est certainement sa « théorie des hiérarchies »<sup>68</sup>. Pattee est intéressé par la question du contrôle, notamment dans les systèmes très complexes, tels que les organismes biologiques. A ce propos, il examine le rôle fonctionnel des organisations hiérarchiques, qui sont capables – de façon quelque peu paradoxale – de

---

<sup>63</sup> Nicolas Rashevsky, *Mathematical Biophysics. Physico-Mathematical Foundations of Biology*, New York, Dover, 1960.

<sup>64</sup> Nicolas Rashevsky, «Topology and Life: in Search of General Mathematical Principles in Biology and Sociology», *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 13, 1954, p. 317-348.

<sup>65</sup> Nicolas Rashevsky, «Topology and Life: in Search of General Mathematical Principles in Biology and Sociology», *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 13, 1954, p. 321, notre traduction.

<sup>66</sup> Howard H. Pattee, «Laws, Constraints, and the Modeling Relation – History and Interpretations», *Chemistry & Biodiversity*, 4(10), 2007, p. 2272-2295.

<sup>67</sup> Voir Jon Umerez, «H. Pattee's Theoretical Biology. A radical epistemological stance to approach life, evolution and complexity», *BioSystems* 60(1/3), 2001, p. 159-177, pour un aperçu.

<sup>68</sup> Howard H. Pattee, «The Physical basis and Origin of Hierarchical Control», in H. H. Pattee (ed.), *Hierarchy Theory*, New York, Braziller, 1973, p. 71-108.

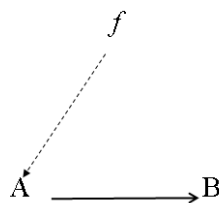
simplifier le comportement du système à un niveau inférieur et, conjointement, de l'enrichir à un niveau supérieur. L'étude des hiérarchies, et de la relation de contrôle, suppose une distinction entre des niveaux causaux, ce que Pattee élabore en termes d'une distinction entre *lois dynamiques* (prises comme lois physiques fondamentales) et *contraintes* (contingentes, holonomes et non-holonomes) exercées sur ces dynamiques. Sans enfreindre les lois fondamentales, certaines structures matérielles peuvent contraindre la dynamique des objets sujets à ces dernières, rendant possible une forme de contrôle de la part du système qui possède ces structures.

Dans ses investigations, Rosen intègre et développe les idées de Rashevsky et Pattee. A l'instar d'autres auteurs tels que Piaget, Maturana et Varela, Rosen considère que l'objectif central de la biologie théorique est l'élaboration de principes d'organisation qui soient distinctifs et propres aux phénomènes vivants. Il partage avec ces auteurs l'idée centrale que l'organisation biologique réalise une forme distinctive de circularité causale, qui régénère matériellement ses propres composants fonctionnels ; comme ces auteurs, il utilise (quoique plus tardivement) le terme « clôture » pour désigner la circularité biologique.

La contribution originale, et cruciale à nos yeux, de Rosen consiste à donner une description théorique et formelle plus précise de la clôture dans au moins deux sens :

- 1) d'une part, il spécifie formellement le *type* de composants sujets à clôture, ainsi que le *niveau* causal auquel elle se réalise dans le système ;
- 2) d'autre part, il décrit explicitement la façon dont des classes d'objets ayant des fonctions différentes réalisent une clôture.

Rentrons quelque peu dans les détails. Rosen accepte et élabore la distinction entre clôture organisationnelle et ouverture thermodynamique. Chez lui, cette distinction est conceptualisée, et modélisée, comme une différence entre deux niveaux de causes, qu'il nomme respectivement – en réinterprétant certaines catégories aristotéliennes – « efficiente » et « matérielle »<sup>69</sup>. Plus formellement, considérons une application  $f$  entre deux ensembles  $A$  et  $B$ , de sorte que  $f: A \rightarrow B$ . Représenté dans un diagramme relationnel, cela donne:



Lorsque ce diagramme est appliqué pour modéliser un système naturel, Rosen affirme que les flèches continues constituent des relations de causalité matérielle, alors que les flèches pointillées représentent des relations causales efficaces. Dans *Life Itself*, Rosen consacre beaucoup de pages à la distinction entre les deux niveaux de causes. Nous croyons que la distinction entre causes efficaces et matérielles a une connexion théorique étroite avec celle entre contraintes et lois dynamiques formulée par Pattee ou, pour reprendre la terminologie que nous avons utilisée ailleurs<sup>70</sup>, entre contraintes et processus (ou réactions). En particulier, toute fonction biologique peut être pensée comme une réalisation de ce schéma relationnel :

<sup>69</sup> Robert Rosen, *Life Itself. A Comprehensive Inquiry into the Nature, Origin and Fabrication of Life*, New York, Columbia University Press, 1991.

<sup>70</sup> Matteo Mossio & Alvaro Moreno, « Organizational Closure in Biological Organisms », *History and Philosophy of the Life Sciences*, 32, 2010, p. 269-288.

un effet fonctionnel B résulte de l'interaction entre un processus ou réaction  $A \rightarrow B$  et l'action d'une contrainte  $f$ . Par exemple, la distribution de l'oxygène à travers le corps se fait sous l'effet (entre autres) du système vasculaire, qui canalise le flux sanguin.

Une fois établie la distinction formelle entre les deux niveaux de causes, Rosen introduit la clôture, sa thèse centrale étant que :

un système matériel est un organisme si, et seulement si, il est clos sous causalité efficiente [...]. Nous soutenons que tout autre chose concernant les organismes, tout ce qui est étudié en biologie, et beaucoup d'autres choses au-delà, émergent et relèvent de cette propriété<sup>71</sup>.

Dans ce formalisme, un système est clos sous causalité efficiente si, et seulement si, son diagramme relationnel possède un chemin clos reliant un ensemble de flèches pointillées. En d'autres termes, le trait distinctif des organismes biologiques consiste en ceci, qu'il existe un ensemble de composants ayant le statut de causes efficientes qui sont matériellement régénérés (par réparation ou remplacement, selon le cas) par et dans le système. Sur ce point, la convergence avec l'autopoïèse est manifeste : la circularité ne concerne pas seulement des capacités homéostatiques d'une organisation, qui par ailleurs présupposerait l'existence et le maintien de ses composants fonctionnels. Il s'agit d'un régime causal dans lequel l'existence même des composants dépend de leur réseau d'interactions dans le système.

Rosen va plus loin. Il modélise la clôture en spécifiant à quel niveau causal elle se réalise dans les organismes biologiques. C'est une clôture entre les causes efficientes et donc, dans l'interprétation que nous proposons, une clôture entre contraintes. Conformément à la tradition scientifique que nous décrivons ici, Rosen met donc la circularité causale au centre de l'organisation biologique, tout en rendant explicite ce qui ne l'était pas chez Piaget ou chez Maturana et Varela. Pour nous, il s'agit d'une contribution essentielle, car elle permet de fonder théoriquement la distinction entre clôture organisationnelle et ouverture thermodynamique : la clôture se réalise entre les causes efficientes (contraintes) qui opèrent sur le flux thermodynamiquement ouvert<sup>72</sup> de matière et énergie (les processus et les réactions).

L'une des conséquences de l'idée que la circularité biologique prend la forme précise d'une clôture de contraintes est que cela permet de dégager une deuxième différence fondamentale (en plus de celle évoquée dans la section précédente) entre l'organisation biologique et l'auto-organisation des structures dissipatives. En effet, nous avons vu plus haut que les structures dissipatives peuvent être décrites comme une classe de systèmes capables d'auto-maintien ; cependant, dans ce cas l'auto-maintien résulte de l'action d'*une seule* cause efficiente (la structure dissipative macroscopique elle-même) qui exerce une contrainte sur les conditions limites. Il n'y a dans ces systèmes qu'une contrainte sujette à circularité causale et donc, par définition, pas de clôture *entre* un ensemble de contraintes qui réalisent une dépendance mutuelles. En d'autres termes, il n'y a pas d'organisation de contraintes, pas d'organisation

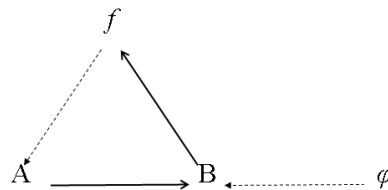
---

<sup>71</sup> Robert Rosen, *Life Itself. A Comprehensive Inquiry into the Nature, Origin and Fabrication of Life*, New York, Columbia University Press, 1991, p.244, notre traduction.

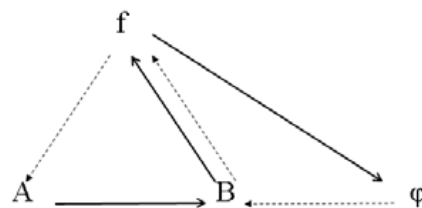
<sup>72</sup> Une référence importante à ce propos est Stuart Kauffman (Stuart Kauffman, *Investigations*. New York, Oxford University Press, 2000), qui a été le premier à exprimer la clôture en termes de jeu entre contraintes et flux thermodynamique. Kauffman a notamment proposé le concept de « cycle Travail-Contrainte » : un système réalise la clôture s'il est capable de produire un travail (défini comme une émission d'énergie sous contrainte) qui régénère les contraintes qui le rendent possible. Malgré son importance, toutefois, nous n'analysons pas la contribution de Kauffman ici, car elle ne nous semble pas apporter un éclairage nouveau sur la question de la circularité comme telle.

fonctionnelle. La différence qualitative entre les organismes biologiques et les systèmes auto-organisés est donc nette, parfaitement capturée lorsqu'on applique le modèle de Rosen pour décrire les régimes causaux circulaires à l'œuvre dans les deux cas.

La deuxième contribution originale de Rosen concerne la façon dont la clôture organisationnelle est construite. Nous avons mentionné que les causes efficaces (et donc, si notre interprétation est valable, les contraintes) sujettes à clôture correspondent aux fonctions biologiques. Or, Rosen décrit la clôture comme un réseau de relations circulaires entre des *classes* de fonctions distinctes, qu'il nomme « métabolisme », « réparation » et « réplication ». Il procède en trois étapes. D'abord, il considère l'ensemble des fonctions métaboliques à l'œuvre dans tout organisme, qu'il représente par l'application  $f: A \rightarrow B$ . Comme la clôture implique, pour Rosen, le fait que les causes efficaces considérées soient produites dans et par le système, il introduit une deuxième classes de fonctions de « réparation »  $\Phi$  (ce que Letelier *et al.*, 2006, proposent d'appeler « remplacement », pour que son sens biologique soit plus évident) qui régénère l'ensemble d'applications  $f$  à partir d'éléments appartenant à l'ensemble B, et donc  $\Phi: B \rightarrow f$ . Graphiquement, la conjonction des deux classes de fonctions donne:



La classe de systèmes décrits par ce schéma relationnel constitue la classe des systèmes « métabolisme-réparation » – *(M,R)-systems* en anglais – qui pour Rosen coïncide avec la classe des organismes biologiques. Pourtant, le modèle n'est pas complet à ce stade car la classe de fonctions  $\Phi$  n'étant pas produite par le système, ce dernier ne réalise pas une clôture des causes efficaces. Afin de clore le système, Rosen introduit une troisième classe de fonctions de « réplication »  $\beta$ , qui est conçue comme un élément de B capable de régénérer  $\Phi$  à partir de  $f$ , et donc  $\beta: f \rightarrow \Phi$ . Graphiquement :



Avec  $\beta \in B$ , le système est clos sous causalité efficace, c'est à dire, pour Rosen, un organisme biologique. Il est important de remarquer que le statut de  $\beta$  fait l'objet d'une discussion dans la littérature récente en biologie théorique<sup>73</sup>. De manière générale, la

<sup>73</sup> Voir par exemple María Luz Cárdenas, Juan-Carlos Letelier, Claudio Gutierrez, Athel Cornish-Bowden, Jorge Soto-Andrade, «Closure to efficient causation, computability and artificial life» *Journal of Theoretical Biology*, 263, 2010, p. 79–92.

démonstration mathématique de son existence<sup>74</sup>, et donc de la circularité de l'organisation biologique, est considérée comme l'un des résultats les plus importants de Rosen<sup>75</sup>.

Le modèle de Rosen est riche<sup>76</sup> et profond et, à ce jour, constitue probablement l'expression la plus intéressante de la circularité biologique. Il soulève néanmoins beaucoup de questions, sur lequel la littérature commence tout juste à se pencher, après plusieurs décennies d'indifférence. L'une d'entre elle concerne la signification biologique de  $\beta$  : à quelle classe de fonctions biologiques réelles correspond elle? A notre connaissance, le problème – que Rosen lui-même appelle le « problème de la réalisation »<sup>77</sup> – reste aujourd'hui intact. Il est toutefois intéressant de mentionner que Letelier et al. (2006)<sup>78</sup> ont proposé d'appeler cette classe de fonctions « invariance organisationnelle », plutôt que « réplication », pour souligner que, en réalisant la clôture,  $\beta$  permet à l'organisation biologique d'être invariante (ou tout du moins stable) à travers le temps, et non pas intrinsèquement éphémère.

Le modèle des  $(M,R)$ -systems de Rosen présente d'autres problèmes et limites, et ouvre par ce fait même un grand nombre de pistes de recherche. C'est dire l'importance qu'il revêt dans la tradition théorique que nous décrivons dans ce chapitre. Comme on l'a vu, il partage avec les autres contributions l'idée que, avant toute autre chose, les organismes biologiques sont caractérisés par leur organisation et que, à son tour, cette organisation est caractérisée par une causalité circulaire<sup>79</sup>. Selon la perspective que nous défendons dans ce chapitre, il constitue donc un fondement naturalisé pour les dimensions distinctivement biologiques telles que la téléologie ou la normativité, ainsi que beaucoup d'autres (voir plus bas). Rosen lui-même considère<sup>80</sup> que la circularité inhérente à l'organisation biologique réhabilite la notion de cause finale : dans un système clos sous causalité efficiente, les causes efficientes sont tout autant causes finales d'autres causes efficientes, ce qui naturalise la dimension téléologique propre au vivant. En même temps, il va significativement plus loin que les autres théorisations dans la spécification des entités sujettes à clôture, le niveau de causalité où cette dernière se réalise ; d'autre part, il exprime clairement l'idée que la clôture est une clôture fonctionnelle,

---

<sup>74</sup> Robert Rosen, «Some Relational Cell Models: The Metabolism-Repair Systems», dans R. Rosen (ed.) *Foundations of Mathematical Biology*, New York, Academic Press, 1972, Vol. 2, p. 217-253.

<sup>75</sup> Nous ne donnons ici aucun détail sur cette démonstration. Voir Juan-Carlos Letelier, Jorge Soto-Andrade, Flavio Guíñez-Abarzua, María Luz Cardenas & Athel Cornish-Bowden, «Organizational Invariance and metabolic closure: analysis in terms of  $(M,R)$  systems», *Journal of Theoretical Biology*, 238, 2006, p. 949-961, pour une discussion approfondie.

<sup>76</sup> Dans Matteo Mossio, Giuseppe Longo & John Stewart, «A Computable Expression of Closure to Efficient Causation», *Journal of Theoretical Biology*, 257(3), 2009, p.489-498, par exemple, nous avons analysé, et contredit mathématiquement, l'une des affirmations les plus connues de Rosen, celle selon laquelle la clôture sous causalité efficiente aurait des modèles non-computables. María Luz Cárdenas, Juan-Carlos Letelier, Claudio Gutierrez, Athel Cornish-Bowden, Jorge Soto-Andrade, «Closure to efficient causation, computability and artificial life» *Journal of Theoretical Biology*, 263, 2010, p. 79–92, développent un examen détaillé de notre résultat, dans le contexte d'une discussion plus générale sur la signification de  $\beta$  dans le modèle de Rosen.

<sup>77</sup> Robert Rosen, *Essays on Life Itself*, New York, Columbia University Press, 2000.

<sup>78</sup> Juan-Carlos Letelier, Jorge Soto-Andrade, Flavio Guíñez-Abarzua, María Luz Cardenas & Athel Cornish-Bowden, «Organizational Invariance and metabolic closure: analysis in terms of  $(M,R)$  systems», *Journal of Theoretical Biology*, 238, 2006, p. 949-961.

<sup>79</sup> Letelier et al. (2003) propose une analyse comparative détaillée des modèles d'autopoïèse et  $(M,R)$ -systems.

<sup>80</sup> Robert Rosen, «Organisms as Causal Systems Which Are Not Mechanisms: An Essay into the Nature of Complexity», in Rosen Robert (ed.), *Theoretical Biology and Complexity. Three Essays on the Natural Philosophy of Complex Systems*, Academic Press, Orlando, 1985.

et fournit une description explicite (encore qu'abstraite) de la façon dont les différentes classes de fonction concourent à réaliser l'organisation circulaire.

## 5. Perspectives

Nous terminons ainsi ce très bref aperçu de la tradition théorique et philosophique qui, au cours des deux derniers siècles, a mis la circularité au centre de l'analyse des phénomènes biologiques. Bien sûr, l'histoire et l'analyse conceptuelle de cette tradition pourraient être beaucoup plus longues et fouillées, et inclure notamment d'autres auteurs, qu'ils soient philosophes, mathématiciens ou biologistes, comme par exemple le biologiste théorique Tibor Ganti, auteur de l'un des plus anciens modèles computationnels de système chimique capable d'autodétermination, le *Chemoton*<sup>81</sup>. En même temps, il nous semble que les approches et modèles décrits dans ces pages représentent des étapes particulièrement importantes dans le processus d'élaboration progressive d'une théorie de l'organisation biologique, et nous avons tenté d'expliquer pourquoi.

Aujourd'hui, le champ de recherche interdisciplinaire sur l'organisation biologique est vaste et riche, et développe dans des directions différentes les idées pionnières mentionnées dans les pages précédentes. Sans prétendre à l'exhaustivité, nous mentionnons ici quelques exemples significatifs, à la fois parmi les approches par modèles et les approches par concepts. Comme nous l'avons noté plus haut, on assiste aujourd'hui à une croissance très importante de tentatives de modélisation de l'organisation biologique. Cependant, il nous semble que la coexistence des deux types d'approches est une richesse de la littérature contemporaine, dans la mesure où elles ne semblent pas remplir la même fonction épistémologique et explicative. Alors que les approches conceptuelles visent à capturer de façon précise quelles sont les propriétés distinctives de l'organisation et de son autodétermination, en fournissant notamment une justification rigoureuse de leur pertinence, les modèles élaborent un système (formel ou pas) qui rend explicite comment un ensemble d'objets (observables, variables, paramètres) en interactions réalise ces propriétés. L'interaction entre les deux attitudes est fructueuse : la conceptualisation guide la modélisation qui, en retour, précise la conceptualisation. La dissociation entre elles peut être délétère, dans la mesure où une conceptualisation qui n'ouvre pas la voie à la modélisation risque d'être stérile, de même que une modélisation qui ne serait pas nourrie par la conceptualisation risque d'être aveugle.

Concernant la modélisation, il existe un nombre important de travaux récents qui élaborent des modèles de « proto-cellules » (à savoir des systèmes dans lesquels un réseau de réactions catalytiques, encapsulé dans une membrane, exhibe des capacités d'auto-maintien, robustesse et reproduction) explicitement inspirés par le concept d'autopoïèse. Ces modèles prennent souvent la forme de simulations computationnelles stochastiques de réseaux relativement simples, mais le plus possible réalistes, de réactions chimiques réalisant une clôture<sup>82</sup>. Très récemment, un ensemble de contributions visant à bâtir une ligne de recherche fondée sur les *(M,R)-systems* de Rosen a également vu le jour. D'une part, certains travaux ont tâché de

---

<sup>81</sup> Tibor Ganti, « Organization of Chemical Reactions Into Dividing and Metabolizing Units: The Chemotons », *BioSystems*, 7, 1975, p. 15-21.

<sup>82</sup> Voir à titre d'exemple les travaux récents de Ruiz-Mirazo et Mavelli : Kepa Ruiz-Mirazo & Fabio Mavelli, « On the way towards 'basic autonomous agents': stochastic simulations of minimal lipid-peptide cells », *BioSystems*, 91(2), 2008, p. 374-387; Fabio Mavelli & Kepa Ruiz-Mirazo, « Theoretical conditions for the stationary reproduction of model protocells », *Integrative Biology*, 5 (2), 2013, p. 324-41.

préciser et approfondir le modèle mathématique original, exprimé en théorie des catégories<sup>83</sup>; d'autre part, des modèles (mathématiques, computationnels et, en partie, chimiques) de protocellules qui implémentent explicitement les  $(M,R)$ -systems ont été élaborés au cours des dernières années<sup>84</sup>.

Sur un plan plutôt conceptuel, il existe depuis quelques années une convergence vers un cadre théorique axé - à la suite de Varela<sup>85</sup> - sur le concept pivot d'*autonomie*<sup>86</sup>. L'autonomie désigne, dans cette littérature, l'ensemble des caractéristiques distinctives des organismes biologiques, c'est-à-dire, dans les termes utilisés dans ce chapitre, la forme spécifique de l'autodétermination biologique. Or, dans ce contexte, l'une des questions centrales consiste à savoir comment la circularité causale - notamment dans la forme technique de la clôture - est intégrée au sein des théories contemporaines de l'autonomie biologique.

En première approximation, il existe au moins deux visions à ce propos. D'une part, on peut concevoir la clôture comme une condition nécessaire et suffisante de l'organisation biologique. L'autonomie serait donc équivalente à la clôture. Comme on l'a vu, Rosen semble pencher vers cette position, en s'appuyant sur une caractérisation très élaborée de la clôture, qui suppose notamment la dépendance mutuelle entre des classes distinctes de fonctions. D'autre part, on peut estimer que la clôture est une condition nécessaire mais pas suffisante de l'autonomie biologique, qui inclurait donc d'autres dimensions. De fait, il nous semble que c'est plutôt vers cette position que s'oriente la plupart des auteurs. Autant une théorie satisfaisante de l'organisation biologique doit s'appuyer sur la clôture pour naturaliser des dimensions biologiques fondamentales - évoquées dans la section 1 -, autant elle doit inclure des aspects et capacités que l'on ne peut pas déduire de la clôture en tant que telle.

L'autonomie est donc, dans ce cas, un concept plus restrictif que celui de clôture ou, pour le dire autrement, la classe des systèmes autonomes (c'est à dire, par hypothèse, biologiques) est plus restreinte que la classe des systèmes organisationnellement clos. En particulier, comme nous l'avons proposé<sup>87</sup>, l'autodétermination biologique inclut certainement des capacités de régulation (et donc d'adaptivité), qui demandent de faire appel à des *hiérarchies* de clôture et organisation. Par ailleurs, une théorie satisfaisante de l'autonomie biologique doit pouvoir articuler de manière cohérente la stabilité de l'organisation (générée par ses capacités d'autodétermination) et la variabilité inhérente aux processus biologiques (qui joue, entre autres choses, un rôle évolutif crucial). Il s'agit ici des relations, complexes et très peu explorées jusqu'à maintenant, entre les principes d'organisation et les dynamiques de l'évolution naturelle.

---

<sup>83</sup> Juan-Carlos Letelier, Jorge Soto-Andrade, Flavio Guíñez-Abarzua, María Luz Cardenas & Athel Cornish-Bowden, «Organizational Invariance and metabolic closure: analysis in terms of  $(M,R)$  systems», *Journal of Theoretical Biology*, 238, 2006, p. 949-961.

<sup>84</sup> Gabriel Piedrafita, Francisco Montero, Federico Moran, Maria Luz Cardenas & Athel Cornish-Bowden, « A Simple Self-Maintaining Metabolic System: Robustness, Autocatalysis, Bistability », *PLoS One*, 2010, 6 (8), e1000872. Gabriel Piedrafita, Kepa Ruiz-Mirazo, Pierre-Alain Monnard, Athel Cornish-Bowden, Francisco Montero, « Viability Conditions for a Compartmentalized Protometabolic System: A Semi-Empirical Approach », *PLoS One*, 2012, 7(6): e39480.

<sup>85</sup> Francisco J. Varela, *Principles of Biological Autonomy*, New York, Elsevier North Holland, 1979.

<sup>86</sup> Kepa Ruiz-Mirazo, Juli Peretó & Alvaro Moreno, « A universal definition of life: autonomy and open-ended evolution », *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 34(3), 2004, p. 323-346.

<sup>87</sup> Alvaro Moreno & Matteo Mossio, *Biological autonomy: a philosophical and theoretical enquiry*, Dordrecht, Springer (à paraître).