

RESEARCH OUTPUTS / RÉSULTATS DE RECHERCHE

Qu'est-ce que le vivant ?

Modera, Astrid

Published in:
Revue des Questions Scientifiques

Publication date:
2022

Document Version
le PDF de l'éditeur

[Link to publication](#)

Citation for pulished version (HARVARD):
Modera, A 2022, 'Qu'est-ce que le vivant ? Perspective relationnelle en biologie', *Revue des Questions Scientifiques*, vol. 192, numéro 3-4, 192.

General rights

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

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

Take down policy

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

À 4 mains... minimum!

Qu'est-ce que le vivant ?

Perspective relationnelle en biologie

ASTRID MODERA
Université de Namur
Département Sciences-Philosophies-Sociétés
astrid.modera@unamur.be

Avec la complicité pédagogique de
Manon GRILLI et Garance HUGO

RÉSUMÉ. – La grande diversité des formes que prend la vie sur Terre est impressionnante. Des végétaux aux animaux, en passant par les champignons et les bactéries, il paraît difficile d'exprimer clairement ce qui leur est commun. Dans cet article, nous discutons la caractérisation du vivant développée en biologie relationnelle, approche principalement élaborée par Robert Rosen (1934-1998), à partir d'exemples simples et quotidiens. Notre objectif est de présenter rigoureusement, mais le plus simplement et le plus clairement possible, la vision du vivant qui y est proposée. Pour ce faire, nous détaillons le modèle relationnel du vivant qu'est le (M,R)-Système, ainsi que les outils nécessaires pour le construire et le comprendre, à savoir la théorie des catégories et la théorie aristotélicienne de la causalité.

ABSTRACT. – The great diversity of life forms on Earth never ceases to amaze us. From plants to animals, and from fungi to bacteria, it remains difficult to put one's finger on exactly what they all have in common. In this article, we discuss the characterization of life — chiefly developed in relational biology by Robert Rosen (1934-1998) — using simple, everyday examples. Our main objective is to present a precise portrayal of what it means to be alive, as expressed by this theory, in as clear and simple terms as possible. To this end, we provide a comprehensive description of the relational model of life, called the (M,R) System, including the tools necessary to construct and understand it, namely the category theory and the Aristotelian theory of causality.

MOTS CLÉS. – Biologie relationnelle — Causalité aristotélicienne — M,R-Système — Robert Rosen — Théorie des catégories

Plan de l'article

1. Introduction
2. La biologie relationnelle
3. La théorie des catégories
4. La théorie aristotélicienne de la causalité
5. Un modèle du vivant : le (M,R)-Système
6. Une définition systémique du vivant
7. Conclusion
8. Pour aller plus loin

1. Introduction

J'ai récemment adopté un chaton et cette arrivée a non seulement modifié mon quotidien, mais m'a également permis de voir autrement la diversité de la vie. En effet, ce petit être a atterri dans un environnement déjà habité par des organismes vivants, à savoir des plantes vertes et des êtres humains, mais il y apporte une autre manière de vivre. Le voir s'attaquer à ces plantes et créer de cette manière un rapport particulier avec d'autres êtres vivants a fait naître en moi cette question étrange : pourquoi peut-on dire que ce chat et ce végétal qu'il griffe et mordille sont tous deux vivants, alors qu'ils semblent si différents ? Que peut-il bien exister chez l'un et chez l'autre qui soit commun au point de leur attribuer le même qualificatif, celui de « vivant » ? Leurs manières de se nourrir, de grandir, de se développer, de naître et de mourir — au final, de vivre — sont tellement différentes qu'on peut avoir du mal à les regrouper dans un ensemble commun.

Cette question est, en fait, celle de la définition de la vie : que doit-on faire ou à quoi doit-on ressembler pour être considéré-e en vie ? Pourquoi les chats et les plantes sont vivantes¹ alors que ces êtres semblent si différents ? Cette ques-

1. J'utilise ici la règle dite « de proximité » pour l'accord des adjectifs et des participes passés. Cette règle, également nommée de contiguïté ou de voisinage, « accorde en genre, et en nombre, l'adjectif, le participe passé et le verbe avec le nom qui les précède ou les suit immédiatement. » (Viennot, 2018, p. 6). La règle plus courante, traditionnellement décrite par la formule « le genre grammatical masculin l'emporte sur le genre grammatical féminin », développée et répandue à partir du XVII^e siècle, le fut en réaction à cette règle de proximité. Cette primauté du genre grammatical masculin sur le féminin fut justifiée par la défense d'une prétendue plus grande noblesse du genre masculin (Vaugelas, *Remarques sur la langue française*, 1647) « à cause de la supériorité du mâle sur la femelle » (Beauzée, 1767, p. 358). Cette règle inscrit dans la langue une domination sociale des hommes sur les femmes (voir, à ce sujet, les travaux des linguistes Eliane Viennot et Lucy Michel). C'est la raison pour laquelle, dans un objectif de lutte contre cette discrimina-

tion a fait réfléchir beaucoup de scientifiques et de philosophes, et de nombreuses définitions ont été proposées, non sans difficultés (Cleland & Chyba, 2002). Certaines définitions, dont l'une très célèbre et reprise par la NASA (Joyce, 1994, pp. XI-XII) — pour qui la définition du vivant est importante dans sa recherche de formes de vie extraterrestres — mettent l'accent sur une combinaison entre une constitution particulière du système et les capacités de celui-ci : un système est en vie s'il est un système chimique auto-suffisant capable de subir une évolution darwinienne. Qu'est-ce que cela signifie, concrètement ? Nous avons ici un critère qui s'applique à la nature des constituants des êtres vivants — ils doivent être chimiques — et deux critères concernant ce que ces éléments, constitués en système, sont capables de faire — s'auto-suffire et subir l'évolution darwinienne.

Appliquons cela à mon chat : cette petite boule de poils possède, en dessous d'une splendide fourrure, un corps composé d'organes, eux-mêmes composés de tissus, formés par des cellules et ainsi de suite jusqu'à, effectivement, des entités de nature chimique : des molécules composées d'atomes. Mais, c'est également le cas de la table dont les pieds servent de grattoir à mon chat, ou de l'ampoule qui nous éclaire. Tous les systèmes chimiques ne sont pas vivants. Deuxième critère : un système doit, en plus d'être chimique, être auto-suffisant. Sous condition d'absorber régulièrement de l'énergie, sous une forme ou une autre, depuis son environnement — donc d'être thermodynamiquement ouvert, un organisme vivant possède tout ce qui est nécessaire pour entretenir et maintenir le système en fonctionnement. Parce que mon chat vit avec moi, je lui fournis cet apport de matière et d'énergie, mais s'il vivait à l'extérieur, il serait également capable de trouver ce qu'il lui faut et, de ce fait, de survivre². Idem pour ma plante : je l'arrose, mais elle est capable de trouver ce qui lui convient pour se maintenir. Troisième critère : ces systèmes chimiques auto-suffisants sont capables de subir l'évolution darwinienne.

Ce dernier point pose un certain nombre de problèmes. En effet, l'évolution darwinienne ne peut s'étudier que sur plusieurs générations : les systèmes vivants doivent en engendrer d'autres, différents d'eux-mêmes, et dont les mieux adaptés survivront par sélection naturelle. Selon cette définition, il est

tion et dans la visée de l'égalité, je lui préférerai la règle de proximité. Je ferai également usage d'une écriture inclusive, en utilisant le point médian (un-e biologiste) ou les formes apposées (les chercheurs et les chercheuses) lorsqu'il sera question de désigner des personnes, des groupes de personnes dont le genre n'est pas spécifié ou de genres multiples.

2. La question de la survie des animaux domestiques, et de rente, sans intervention humaine est cependant très discutée. Voir par exemple Jeangène Vilmer (2011).

donc nécessaire que chaque système vivant, en plus de posséder tout un attirail génétique, soit capable de se reproduire. Or, il existe un certain nombre d'organismes vivants stériles — comme la mule, par exemple — qu'on ne verrait pas rejeter de la catégorie « être vivant » par simple inadéquation avec cette définition darwinienne³. Aussi importante que soit la théorie de l'évolution pour l'étude du vivant, elle ne peut donc être une condition nécessaire à la définition de la vie.

Le critère d'autosuffisance du système chimique semble par contre assez prometteur, mais encore très flou. Qu'est-ce que cela signifie ? Comment rendre compte et analyser cette autosuffisance ? Comment la rendre applicable autant aux chats, qu'aux plantes, aux champignons, aux bactéries et aux êtres humains, si toutes ces entités sont vivantes au même titre ?

C'est ce que je vous propose d'explorer ici. Si la caractéristique essentielle des êtres vivants est d'être autosuffisants, de quelle manière le sont-ils ? Comment en rendre compte vu la diversité des formes que prend la vie ? Une branche de la biologie, développée à partir de la moitié du XX^e siècle, s'est donné cet objectif, en cherchant à proposer un modèle suffisamment abstrait pour tenir compte de tous les êtres vivants, mais assez précis pour ne concerner que ceux-ci. Il s'agit de la biologie relationnelle.

2. La biologie relationnelle

Cette branche de la biologie fut principalement développée par le biologiste étasunien Robert Rosen (1934-1998) à partir de la seconde moitié des années 1950. Cette époque est traditionnellement caractérisée par la naissance et le développement de la biologie moléculaire, à partir des travaux de Watson, Crick et Franklin sur la structure de l'ADN (1953). Bien que l'approche moléculaire en biologie vise également à rendre compte de caractéristiques communes aux êtres vivants, elle sera vivement critiquée par Rosen qui n'en partage pas la démarche réductionniste. Selon lui, on ne peut étudier et chercher à comprendre la spécificité du vivant en réduisant celui-ci à ses composants chimiques ou physiques. Il estime d'ailleurs que le terme même de « biolo-

3. Il faut noter également que certaines espèces se reproduisent par parthénogenèse — reproduction par division de gamètes femelles, sans fécondation donc, et, même si ce mode de reproduction ne produit pas des individus parfaitement identiques à la génération précédente, elle ne fournit pas assez de diversité génétique pour être permettre une évolution darwinienne. Cette dernière ne peut donc s'appliquer à tous les individus vivants.

gie moléculaire » constitue un oxymore, puisqu'il n'existe aucune vie au niveau moléculaire (Mikulecky, 2001, p. 318). Il faut par conséquent rester au niveau de l'organisme, au niveau du tout unifié, afin d'en comprendre la spécificité. Autrement dit, si je veux comprendre ce qui regroupe mon chat et ma plante dans la catégorie « être vivant », la biologie relationnelle me conseille d'étudier leur organisation globale, donc les relations entre les éléments qui les constituent, d'où le nom de cette approche, et de laisser de côté leur génome.

L'idée de la biologie relationnelle est de mettre en lumière ce qui est commun à tous les êtres vivants — pour répondre à la question « qu'est-ce que la vie ? » — et cela passe, pour les biologistes relationnels comme Rosen, par une prise de distance offrant un point de vue plus large sur ce que l'on considère comme vivant. Individuellement, les êtres vivants paraissent très divers, voire incomparables les uns aux autres. Cependant, malgré leurs différences parfois nombreuses, ils sont tous qualifiés de vivants. Les biologistes relationnels cherchent à expliquer le vivant non par l'étude de la nature de ses composants, mais par l'étude du système vivant en tant que tout unifié, ce qui nécessite d'abstraire un modèle susceptible de représenter tous ces systèmes vivants particuliers.

Rosen défend l'idée que la spécificité du vivant est à chercher dans son *organisation*. Il faut arrêter de chercher à comprendre le vivant et son comportement en le réduisant aux entités matérielles qui le constituent. Et ce que les organismes vivants ont en commun, au niveau organisationnel, c'est tout d'abord une fonction métabolique. Le métabolisme, ou fonction métabolique, est ici à prendre dans un sens très large : il s'agit d'une suite de processus transformant de la matière ou de l'énergie d'un certain type, en de la matière ou de l'énergie différente. Tous les organismes vivants, pour être qualifiés comme tels, effectuent ce genre de transformation d'une manière ou d'une autre : par photosynthèse pour ma plante ou par absorption de nutriments pour mon chat, par exemple. C'est le point de départ de Rosen pour construire son modèle d'organisme vivant.

Pour représenter de la manière la plus claire possible cette fonction fort générale et pour atteindre un niveau d'abstraction suffisant pour concerner tous les êtres vivants dans leur diversité, Rosen utilise un outil mathématique particulier : la théorie des catégories⁴, qui étudie les structures mathématiques et leurs relations. L'usage de cette théorie et le degré d'abstraction qu'elle permet

4. Fondée en 1945 par deux mathématiciens, Samuel Eilenberg et Saunders MacLane, dans un article intitulé *General Theory of Natural Equivalences*.

sont deux des raisons majeures pour lesquelles la biologie relationnelle a été peu étudiée et n'a eu, de ce fait, que peu d'influence sur le développement de la biologie. Ce qui, selon moi, est fort regrettable, car cette approche de la biologie propose un point de vue unique, rigoureux et riche sur le vivant, et vaut par conséquent le détour. Alors, allons-y !

3. La théorie des catégories

Pour bien comprendre ce que Rosen propose en utilisant cet outil, il va falloir mettre les mains dans le cambouis. Cela va devenir assez technique, mais la volonté est de donner tous les outils pour comprendre la particularité de cette approche de la biologie. Nous verrons en effet que la définition du vivant qui y est proposée contient des éléments qui peuvent paraître contre-intuitifs, comme la clôture causale, mais que cela tient la route, et le formalisme apporte la rigueur nécessaire à la défense d'une idée aussi originale. De plus, comme nous allons le voir, la théorie des catégories constitue l'outil mathématique par excellence pour représenter et analyser les relations, qui sont au cœur de la biologie relationnelle.

Commençons par présenter les éléments fondamentaux de la théorie des catégories⁵. Une catégorie est composée d'objets, de relations entre ces objets et de règles auxquelles obéissent ces relations. Nous utiliserons ici le terme de *morphisme* pour désigner ces relations. Voyons tout cela plus précisément :

- Les objets d'une catégorie C peuvent être des ensembles, des graphes, des classes ou d'autres objets mathématiques, et sont désignés par des lettres majuscules (A, B, C, \dots). Voilà déjà qui montre la possibilité d'abstraction de la théorie des catégories : les objets dont elle s'occupe sont des objets mathématiques habituellement traités par d'autres branches des mathématiques (théorie des ensembles, théorie des graphes, etc.). La théorie des catégories ne va pas se substituer à ces théories déjà existantes, mais bien s'y ajouter, en mettant en lumière les relations que peuvent entretenir ces objets plutôt que ce qui les constitue.
- Les morphismes (relations entre objets) sont désignés par des lettres minuscules (f, g, h, \dots) et représentés par des flèches. Ils ont un objet comme domaine et un objet comme codomaine. Un morphisme

5. Cette présentation est principalement basée sur l'ouvrage de Lawvere, F. W. & Schanuel, S. H., *Conceptual Mathematics : A First Introduction to Categories* (1997).

f allant du domaine A au codomaine B est représenté comme ceci :

$$A \xrightarrow{f} B, f: A \rightarrow B, \text{ ou } f(A, B).$$

- Pour chaque objet A d'une catégorie, il existe un morphisme qui possède A comme domaine et comme codomaine ; il s'agit du morphisme identité $1_A : A \xrightarrow{1_A} A$. Autrement dit, c'est la relation d'identité qu'un objet a avec lui-même.
- Pour chaque paire de morphismes $A \xrightarrow{f} B \xrightarrow{g} C$, il existe un morphisme de composition : $A \xrightarrow{g \circ f} C$ (ce morphisme se lit « g après f »). On applique d'abord f de A vers B , puis g de B vers C . Pour que la composition des morphismes soit possible, il est nécessaire que le domaine d'un des morphismes soit le codomaine de l'autre. Ici, B est le domaine du morphisme g et le codomaine du morphisme f .

Il s'agit des données de base d'une catégorie, et ces données suivent les règles suivantes :

- Les règles de l'identité : si $A \xrightarrow{f} B$, alors $1_B \circ f = f$ et $f \circ 1_A = f$. Autrement dit, si j'applique d'abord f de A vers B , puis 1_B de B vers B , j'ai le même résultat que si j'avais simplement fait f . De même, si j'applique d'abord 1_A de A vers A , puis j'applique f de A vers B , j'obtiens le même résultat que si j'avais uniquement appliqué f .
- La règle d'associativité : si $A \xrightarrow{f} B \xrightarrow{g} C \xrightarrow{h} D$, alors $(h \circ g) \circ f = h \circ (g \circ f)$. En présence de trois morphismes qui peuvent s'appliquer à la suite (donc le codomaine du premier est le domaine du deuxième, et ainsi de suite), on peut grouper indifféremment les compositions de ces morphismes. Que l'on aille d'abord de A vers B (c'est le morphisme f), puis de B directement vers D (c'est la composition $h \circ g$), ou que l'on aille de A vers C (avec la composition $g \circ f$), puis de C vers D (avec le morphisme h), on obtient le même résultat.

Ces éléments constituent la base de la théorie des catégories et les seules informations nécessaires à la construction d'une catégorie.

C'est aussi à partir de ces seuls éléments de base que Rosen construit un modèle mathématique du vivant. Nous avons vu plus haut que le point commun à tous les êtres vivants, dont il part, est le métabolisme. Cette fonction est simplement considérée comme un processus au cours duquel des *inputs* sont transformés en *outputs*. Par exemple, de la matière, sous forme de croquettes,

constitue un *input* du processus métabolique de mon chat, dont certains des *outputs* seront les vitamines, glucides, lipides et protéines lui permettant de vivre et de grandir.

Le postulat épistémologique que décide d'adopter Rosen en utilisant la théorie des catégories est que tout processus est un morphisme (Louie, 2009, p. 98), c'est-à-dire que tout processus peut être représenté, en théorie des catégories, par une flèche allant d'un objet, le domaine, vers un autre objet, le codomaine. La fonction métabolique générale, considérée abstraitement, c'est-à-dire sans chercher à représenter tous les éléments responsables de son fonctionnement, est représentable en termes catégoriels par un morphisme $A \xrightarrow{f} B$, ou $f(A, B)$; l'ensemble A représentant les *inputs* et l'ensemble B les *outputs*. Il faut noter que A et B sont bien des ensembles (même si la théorie des catégories autorise qu'ils soient des objets mathématiques de nature différente) et que ce qui regroupe les *inputs* dans l'ensemble A n'est en rien leur nature, puisqu'il peut s'agir, en fonction des besoins de l'organisme, aussi bien de nourriture, que d'oxygène ou de lumière. Ce qui permet de regrouper cette diversité d'éléments dans le même ensemble est le simple fait que tous ces éléments sont absorbés par le système vivant et qu'ils participent à son métabolisme. De même, l'ensemble B regroupe tous les éléments qui résultent du processus métabolique, quelle que soit leur nature. Tout organisme vivant possède donc une série d'opérations constituant ensemble son métabolisme, cette série pouvant être représentée par un morphisme.

Afin d'insister sur l'importance de considérer le métabolisme comme un processus, Rosen propose une autre représentation de ce morphisme $f(A, B)$:

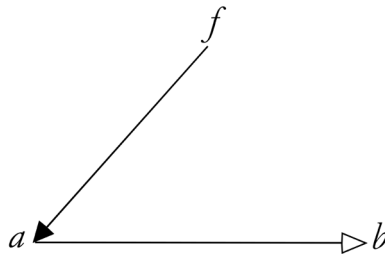


Fig. n°1.

Diagramme relationnel d'un morphisme $f(A, B)$, avec a appartenant à A et b appartenant à B .

Source : composition personnelle à partir de Rosen (1991).

Rosen nomme cette nouvelle représentation *diagramme relationnel*, et il la choisit parce qu'elle permet de dissocier deux relations différentes dans le mor-

phisme, dans le processus. Ce diagramme peut en effet se traduire comme suit : un morphisme f agit sur un élément a de l'ensemble A pour donner un élément b de l'ensemble B . La flèche pleine allant de f à un élément a de A représente l'action de f sur a , tandis que la flèche vide, allant de l'élément a à l'élément b représente la relation entre a et b sous l'action de f . La représentation du morphisme f s'appliquant sur l'élément particulier a pour obtenir l'élément particulier b s'écrit $f: a \rightarrow b$.

Avec cette représentation, Rosen s'éloigne délibérément de la notation communément utilisée en théorie des catégories parce qu'elle offre un autre regard sur ce qu'est un processus, et sur ce qu'une modélisation grâce aux mathématiques peut apporter. En effet, si le but de la science est bien de chercher à comprendre le « pourquoi » des choses, ce qui revient à chercher les causes de ces choses, selon lui, la conception moderne de la causalité, qui ne considère comme cause que ce qui produit un effet et qui lui est donc nécessairement antérieur, est trop étriquée pour comprendre le vivant : il faut l'élargir et, pour cela, relire Aristote.

4. La théorie aristotélicienne de la causalité

Une autre raison de la marginalité de la biologie relationnelle est cette intégration de la théorie aristotélicienne de la causalité. En effet, des siècles de construction d'une méthode scientifique rigoureuse ont rejeté l'approche de ce philosophe grec, qui semblait incompatible avec des visions galiléenne et newtonienne de l'investigation du monde⁶. L'une des incompatibilités majeures, et nous aurons l'occasion d'en comprendre la raison ci-dessous, est liée à la défense moderne du principe d'antériorité des causes sur les effets. Si bien qu'une brève présentation de cette antique théorie se révèle ici indispensable. Chez Aristote, la cause se dit *αἰτία* et signifie *explication* au sens large. Raison pour laquelle il considère que les causes peuvent être de quatre types :

- La *cause matérielle* : « ce à partir de quoi quelque chose advient, et qui se trouve en elle » (Aristote, trad. 2012, p. 113 [II 3, 194b23-24]). Il est important de noter que cette cause matérielle n'est pas nécessairement de la matière physique. En effet, Aristote considère, par exemple, que les lettres sont la cause matérielle d'une syllabe (Aristote, trad. 2012, p. 114 [II 3, 195b16-17]).

6. Voir, par exemple, l'ouvrage d'Alexandre Koyré *Du monde clos à l'univers infini* (1973).

- La *cause formelle* : « la forme et le modèle, c'est-à-dire l'énoncé de l'être essentiel et les genres de celui-ci » (Aristote, trad. 2012, p. 113 [II 3, 194b27-28]).
- La *cause efficiente* : « ce d'où vient le premier principe du changement ou du repos [...] ce qui produit [est cause] de ce qui est produit et ce qui fait changer [est cause] de ce qui change » (Aristote, trad. 2012, p. 113 [II 3, 194b30-33]).
- La *cause finale* : « la fin, c'est-à-dire ce en vue de quoi » (Aristote, trad. 2012, p. 113 [II 3, 194b34]). Ce quatrième type de cause, en violant le principe d'antériorité des causes sur les effets, participe au rejet de la théorie aristotélicienne.

Or, ce qui est remarquable, c'est que ces quatre types de causes sont en quelque sorte contenus dans le morphisme censé décrire de manière purement formelle le métabolisme d'un être vivant. Cela se remarque aussitôt que l'on représente⁷ ce morphisme comme à la figure 1. Ce diagramme montre en effet que, loin de n'être que la relation formelle qu'entretiennent les éléments des ensembles A et B, le morphisme f est aussi ce qui agit sur un élément a de l'ensemble A pour donner un élément b de l'ensemble B, c'est-à-dire qu'il est également « ce qui produit » ; et, de surcroît, qu'il le fait à partir de a , qui est donc « ce à partir de quoi quelque chose advient », et avec le résultat b , qui est donc « ce en vue de quoi ». La cause formelle de ce morphisme en est sa structure, c'est-à-dire la combinaison des flèches, des liens entre les éléments du morphisme. Voici comment cette idée peut être représentée (Louie, 2009, p. 112. Notre traduction) :

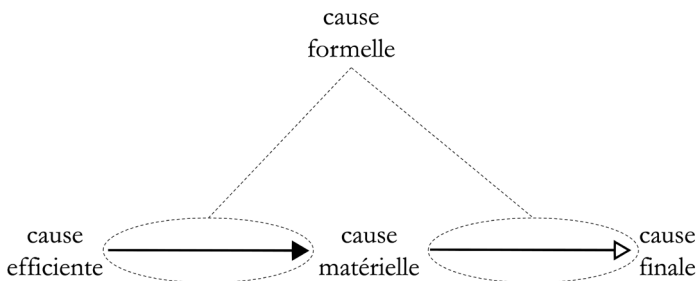


Fig. n°2.
Représentation des 4 causes aristotéliciennes d'un morphisme.

Source : composition personnelle à partir de Louie (2009).

7. Ce qu'avait fait Robert Rosen dans le chapitre 3 de son livre majeur *Life Itself* (1991), chapitre centré sur l'implication dans les systèmes formels (pp. 39-66).

Dans cette figure, chaque type de cause a sa place : la cause efficiente est au début d'une flèche pleine, la cause matérielle à la fin d'une flèche pleine et au début d'une flèche vide, la cause finale à la fin d'une flèche vide et la cause formelle est la conjonction des flèches pleine et vide.

Dans le cas du métabolisme, la cause matérielle, quelle que soit la forme sous laquelle elle est se présente — nourriture, oxygène, lumière — provient de l'environnement. Tout organisme vivant est en effet un système ouvert, d'un point de vue thermodynamique : il absorbe et rejette de l'énergie et de la matière sous différentes formes (par exemple, mon chat a un système digestif très efficace...). Mais il n'est pas que ça. Le métabolisme est nécessaire à la définition du vivant, mais il n'est pas suffisant. En effet, il n'y a pas que des organismes qui sont capables d'absorber des éléments dans leur environnement et d'en rejeter d'autres. N'importe quelle machine mécanique est capable de faire cela⁸. Nous disposons d'un bon point de départ donc, mais qu'il va falloir à présent développer pour aboutir à un modèle représentant exclusivement les organismes vivants, c'est-à-dire ces organismes-là et rien qu'eux. Avec le métabolisme, je peux déjà distinguer mon chat et ma plante de ma table, qui n'absorbe pas d'énergie ni ne la transforme, mais un autre objet du quotidien, non pas la table à laquelle nous avons pensé au début, mais une ampoule, par exemple, est capable de faire ce type de transformation. Il nous faut aller plus loin.

5. Un modèle du vivant : le (M,R)-Système

Si le métabolisme ne suffit pas à définir le vivant, que faut-il lui ajouter ? L'une des caractéristiques qui semblent distinguer plus clairement un organisme d'une machine est son autonomie. Effectivement, une machine est capable d'une forme de métabolisme, mais elle ne peut le faire d'elle-même. Il est nécessaire de la construire et de lui injecter un programme indiquant quoi faire. Si l'autonomie est une autre caractéristique essentielle du vivant, comment en rendre compte dans notre modèle mathématique ? Qu'est-ce qui assure l'autonomie de l'organisme ? Qu'est-ce qui cause ce métabolisme ? Pour répondre à ces questions, retournons à l'analyse de la figure 1, représentant le processus métabolique. En effet, le formalisme de la théorie des catégories va, une fois de plus, nous accompagner dans cet approfondissement.

8. On peut penser, par exemple, à l'installation de l'artiste belge Wim Delvoye, *Cloaca* (2000), qui est constituée d'une machine reproduisant le fonctionnement d'un système digestif humain.

Dans ce schéma, la cause matérielle, l'élément a , est externe au morphisme qui nous intéresse, à savoir le métabolisme. Il vient de l'environnement, il entre dans le système, mais n'est pas produit par celui-ci. L'élément b , la cause finale du morphisme $f: a \rightarrow b$, par contre, est le produit, le résultat final du métabolisme. Nous savons donc ce qui le produit. Un seul élément du schéma reste ainsi inexpliqué : f lui-même. L'élément a vient de l'environnement et l'élément b est le résultat du métabolisme. Qu'est-ce qui produit f en tant que cause efficiente de $f: a \rightarrow b$? Autrement dit, de quel processus f est-il la cause finale ?

Pour répondre à cette question, nous allons proposer un nouveau processus, comportant les 4 types de causes, dont on connaît déjà la cause finale : f . Ce nouveau morphisme, appelons-le Φ , va agir sur un élément x , pour faire apparaître f . Voici une représentation du système constitué de ces deux morphismes :

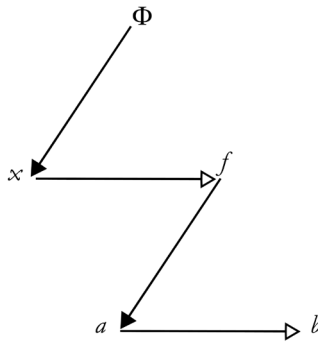


Fig. n°3.

Diagramme relationnel des morphismes métabolisme et réparation.

Source : composition personnelle à partir de Rosen (1991).

Ce morphisme supplémentaire Φ est nommé *réparation*, par Rosen. Nous avons donc un système (M,R), pour *métabolisme* et *réparation*, le deuxième permettant d'expliquer le premier. Pour revenir à mon chat : il possède une fonction métabolique, un ensemble de processus transformant de la matière et de l'énergie, provenant de son environnement, en de la matière et de l'énergie utilisables par l'organisme et dont l'excès est évacué dans l'environnement. Cette fonction métabolique, dont fait partie la nutrition par exemple, est le résultat d'une autre fonction : la réparation. Comme nous nous situons à un niveau formel et abstrait, il n'est pas évident de trouver une correspondance exacte de cette fonction de réparation dans la réalité matérielle du corps de mon chat, mais nous aurons l'occasion d'y revenir.

Cela étant, l'ajout du morphisme *réparation* pour expliquer le morphisme *métabolisme* amène de nouvelles questions : d'où viennent x et Φ ? Sont-ils extérieurs au système vivant, tout comme a provenant de l'environnement ? Le constat de l'autonomie des organismes vivants conduit Rosen à refuser cette hypothèse et à chercher au sein du système déjà en présence les éléments permettant d'assurer cette implication de f . Il va donc identifier l'élément x avec l'élément b en procédant de la manière suivante :

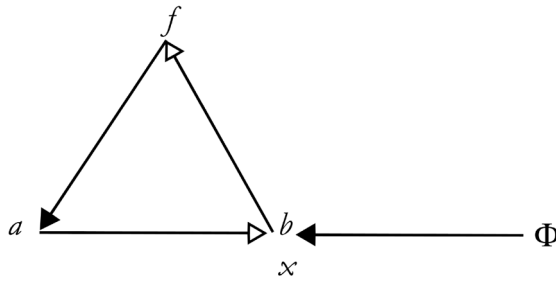


Fig. n°4.
Identification de x et de b .

Source : composition personnelle à partir de Rosen (1991).

Cette identification peut sembler impossible si l'on prend en compte la vision temporelle de la causalité. Comment un élément, ici f , peut-il être le fruit d'un processus s'appliquant sur un autre élément, b , dont il est lui-même la cause ? N'y a-t-il pas ici un problème d'auto-causation, f participant à sa propre existence, par le biais de la production de b ? Cela pose effectivement question, mais la réponse des biologistes relationnels est que nous travaillons ici avec une causation aristotélicienne, et non moderne. La notion de cause n'a pas le même sens que celui dont nous nous satisfaisons aujourd'hui. Comme le montre le dessin, l'élément f ne remplit pas le même rôle causal dans les deux morphismes ici représentés : il est tantôt cause efficiente, tantôt cause finale. De plus, il s'agit ici d'une représentation formelle d'un système, et cela permet une prise de distance par rapport à la temporalité qui s'applique aux systèmes naturels, c'est-à-dire matériels. Le temps n'a pas d'importance dans le monde formel.

Cependant, il reste une inconnue : d'où provient Φ ? Il constitue le seul élément non expliqué dans ce schéma. De quel morphisme est-il la cause finale ? Pour continuer dans la voie prise par Rosen, une manière de répondre à cette question est d'ajouter des éléments nouveaux pour construire un morphisme, un processus dont résultera l'existence de Φ . Voici la représentation de cette idée :

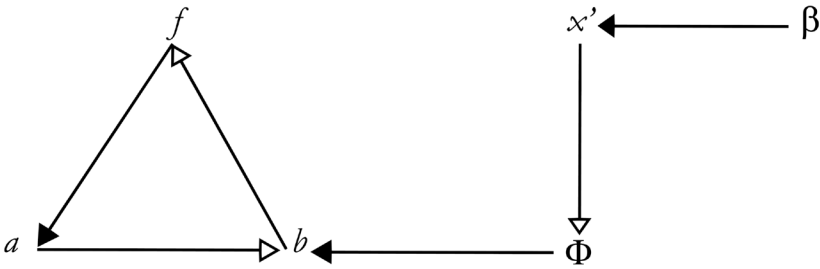


Fig. n°5.

Ajout du morphisme β pour expliquer Φ .

Source : composition personnelle à partir de Rosen (1991).

La cause finale Φ s'obtient à partir d'une cause matérielle x' et d'une cause efficiente β , pour l'instant toutes deux encore extérieures au système initial.

Intéressons-nous tout d'abord à x' . Il est la cause matérielle du nouveau morphisme β . Ne pouvons-nous pas trouver, dans le schéma à notre disposition, un élément à même de jouer le rôle de cause matérielle pour ce morphisme ? Le seul élément disponible, c'est-à-dire, n'étant pas déjà cause matérielle d'un autre morphisme, est f . Rosen va donc opérer une identification de x' avec f (figure 6), ce qu'autorise une compréhension aristotélicienne de la cause matérielle. En effet, il est tentant de ne considérer cette dernière qu'en tant qu'entité matérielle à proprement parler, c'est-à-dire comme un objet physique quelconque. Cependant, comme nous l'avons signalé, cette exclusivité n'est aucunement la règle. En effet, la cause matérielle aristotélicienne est simplement « ce à partir de quoi la chose est faite » et cette base peut fort bien être de nature non matérielle (comme des lettres pour une syllabe, par exemple). Et cette indétermination de la nature de la cause matérielle permet l'identification opérée par Rosen, puisque f , qui est un processus, une action, et qui n'est par conséquent pas une entité matérielle, peut néanmoins être une cause matérielle dans ce nouveau morphisme.

Cette identification de x' et de f simplifie le schéma et se fait de façon assez aisée avec les moyens à notre disposition. Mais nous n'avons pas fini : il reste un élément encore inexpliqué, β . L'idée magistrale de Rosen est d'identifier β avec l'élément b , élément déjà bien connu dans notre système, mais nous allons devoir nous remonter encore plus les manches pour comprendre ce tour de force.

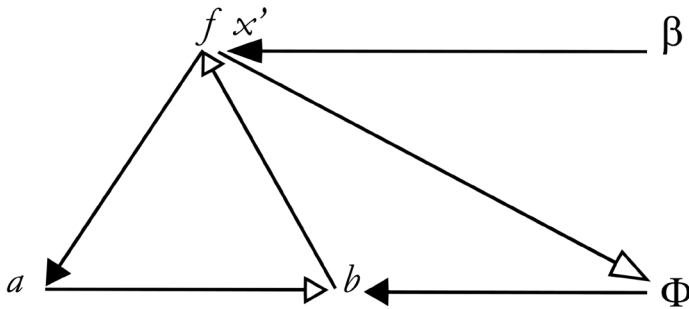


Fig. n°6.
Identification de x' et de f .

Source : composition personnelle à partir de Rosen (1991).

Ce morphisme $\beta : f \rightarrow \Phi$, qui est responsable de Φ , est appelé *réplication* par Rosen (Rosen, 1959, p. 115). Une petite remarque ici : le terme choisi par Rosen pour nommer ce morphisme, *réplication*, ne correspond pas à la fonction de réplication de l'ADN qui a lieu durant la mitose. En effet, au moment où Rosen développe ces termes, c'est-à-dire en 1958 et 1959, la biologie moléculaire en est encore à ses débuts puisque la découverte de la structure en double hélice de l'ADN par Watson, Crick et Franklin date de 1953, si bien que le terme de réplication (de l'ADN) n'est pas encore d'usage courant lorsque Rosen développe son (M,R) -Système (Louie, 2009, pp. 268-269).

Ces précisions faites, nous pouvons nous plonger dans la compréhension du morphisme de réplication selon Rosen. Pour cela, nous allons suivre un article publié en 1966 et intitulé *A Note on Replication in (M,R) -Systems* (Rosen, 1966, pp. 149-151). Ce court article d'à peine 3 pages est crucial pour comprendre le tour de force que représente l'intégration du morphisme de réplication dans le système (M,R) déjà présent.

Pour cela, nous avons besoin d'une autre représentation formelle des morphismes qui nous occupent. Le morphisme *métabolisme* $f : A \rightarrow B$ peut à son tour être considéré comme un élément d'un ensemble désigné par $H(A,B)$ et reprenant tous les morphismes allant de l'ensemble A vers l'ensemble B , comme aussi g et h , par exemple. Graphiquement, cela donne ceci :

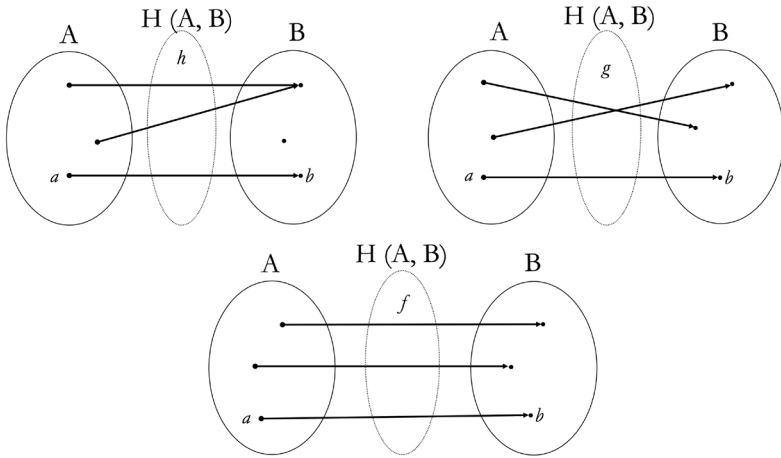


Fig. n°7.

L'ensemble $H(A, B)$ est l'ensemble des morphismes allant de l'ensemble A vers l'ensemble B.

Source : composition personnelle.

Ce que cette représentation (non usuelle !) nous apporte, c'est la possibilité d'utiliser un nouvel élément de la théorie des catégories qui va nous aider à comprendre toutes les subtilités de la biologie relationnelle. Ce nouvel élément est ce que l'on appelle un *morphisme d'évaluation*.

Prenons un ensemble de morphismes $H(X, Y)$: l'ensemble des morphismes allant de l'ensemble X à l'ensemble Y. À partir d'un élément x de l'ensemble X, il est possible de construire le morphisme d'évaluation suivant : $\hat{x} : H(X, Y) \rightarrow Y$.

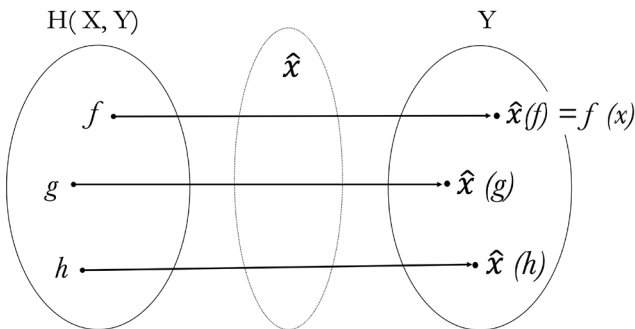


Fig. n°8.

Représentation graphique du morphisme d'évaluation .

Source : composition personnelle.

Ce morphisme \hat{x} a donc comme domaine de départ l'ensemble des morphismes allant de l'ensemble X à l'ensemble Y , et comme domaine d'arrivée l'ensemble Y lui-même (voir figure 8). Nous voyons ici que nous nous sommes élevés en abstraction. C'est-à-dire qu'au lieu de considérer simplement des ensembles et d'envisager des relations, des morphismes entre ceux-ci, nous pouvons considérer tous les morphismes entre ces ensembles comme appartenant à un ensemble : $H(X, Y)$, et nous en servir comme de n'importe quel autre ensemble. Le morphisme d'évaluation va donc mettre en correspondance un ensemble de morphismes avec un ensemble d'éléments dont nous ne connaissons pas la nature. Cette prise de distance, cette montée dans l'abstraction est rendue possible par la théorie des catégories et constitue l'un des atouts majeurs de son utilisation en biologie relationnelle.

Le morphisme \hat{x} opère de la façon suivante : $\hat{x}(f) = f(x)$; et ce pour tout f appartenant à l'ensemble $H(X, Y)$, $f(x)$ étant un élément y de l'ensemble Y . Exprimé autrement, cela signifie qu'à partir d'un élément d'un ensemble, nous pouvons construire un morphisme qui mettra en correspondance un morphisme avec le résultat de son application à cet élément. Chaque élément x de l'ensemble X implique donc l'existence d'un morphisme \hat{x} , élément de l'ensemble $H(H(X, Y), Y)$. Et la construction de ce morphisme établit un lien entre \hat{x} et x , ce lien ayant pour conséquence d'intégrer X comme sous-ensemble de l'ensemble de morphismes $H(H(X, Y), Y)$ (Rosen, 1966, p. 149), c'est-à-dire l'ensemble des morphismes entre $H(X, Y)$, qui est l'ensemble des morphismes allant de X vers Y , et l'ensemble Y . En effet, l'une des lectures possibles de l'action d'un morphisme c'est que, en établissant une relation entre deux ensembles, il projette les éléments du premier ensemble dans le second. Ce premier ensemble peut donc être considéré comme un sous-ensemble du second, étant donné que tous ces éléments ont une correspondance dans le second ensemble, autrement dit sont projetés dans celui-ci. Ici, l'ensemble X est projeté tout d'abord dans Y , sous l'action de f , puis f et les autres éléments de $H(X, Y)$ sont projetés dans Y , sous l'action de \hat{x} .

Or, ce morphisme d'évaluation ressemble étrangement à l'un des morphismes présents dans le système (M, R) que Rosen a construit : le morphisme réparation Φ . En effet, comme nous l'avons vu à la figure 4, le morphisme Φ relie un élément d'un ensemble et un autre morphisme, en l'occurrence l'élément b et le morphisme f . Cependant, il opère ce lien dans l'autre sens (voir figure 9). En effet, au lieu d'aller du morphisme vers l'élément, comme le fait \hat{x} , Φ va de l'élément au morphisme. C'est comme si Φ était l'inverse de \hat{x} .

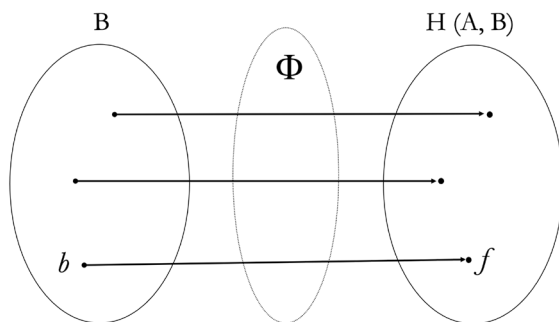


Fig. n°9.

Morphisme Φ allant de l'élément b , appartenant à l'ensemble B , vers l'élément f , appartenant à l'ensemble $H(A, B)$.

Source : composition personnelle.

Et, en fait, c'est exactement cela ! La théorie des catégories permet en effet de concevoir une telle possibilité grâce à la notion de morphisme inverse. Prenons un morphisme $f(A, B)$. Le morphisme inverse à f , qui sera noté f^{-1} , est, s'il existe, un morphisme, unique, qui va de B vers A et qui respecte les égalités suivantes : $f^{-1} \circ f = 1_A$ et $f \circ f^{-1} = 1_B$. Traduisons cela : si on applique d'abord le morphisme f de A vers B , puis le morphisme inverse f^{-1} de B vers A , on retombe sur l'ensemble A , et comme si nous avons appliqué le morphisme identité 1_A . De même, si nous appliquons d'abord le morphisme f^{-1} de B vers A , puis le morphisme f de A vers B , nous retombons sur l'ensemble B . Si un tel morphisme inverse existe, le morphisme $f(A, B)$ sera appelé *isomorphisme* et les objets A et B seront dits *isomorphes* (Lawvere & Schanuel, 1997, p. 40). L'étymologie du terme est ici éclairante : le mot *isomorphe* vient des termes grecs ἴσος (*isos*, qui signifie « même ») et μορφή (*morphè*, qui signifie « forme »). Deux ensembles isomorphes sont deux ensembles qui ont la même forme. Cela signifie également que chaque élément dans l'ensemble de départ A possède une et une seule image dans l'ensemble d'arrivée B . Φ est donc le morphisme inverse d'un morphisme évaluation allant initialement de f vers b . Le morphisme Φ va de l'ensemble B vers l'ensemble $H(A, B)$.

Nous avons, jusqu'à présent, expliqué les morphismes f et Φ au moyen d'outils proposés la théorie des catégories. L'étape suivante est de s'atteler au troisième morphisme du (M, R) -Système : le morphisme β . Pour cela, commençons par construire, à partir d'un élément b de l'ensemble B , le morphisme évaluation \hat{b} . Si ce morphisme est inversible, il détermine un inverse unique noté \hat{b}^{-1} . Ce morphisme a la propriété que, si $b = f(a)$ pour tout élément a appartenant à l'ensemble A , et que $\Phi(f(a)) = f$, alors $\hat{b}^{-1}(f) = \Phi$. Autrement dit,

nous sommes ici en présence d'un morphisme qui a pour résultat Φ , comme nous l'espérons. Ce morphisme \hat{b}^{-1} peut donc être appelé β (Rosen, 1966, p. 150). Il est important de rappeler qu'une condition est nécessaire pour que ce morphisme, qui est un morphisme inverse, existe : il faut que le morphisme initial \hat{b} à partir duquel il est construit soit un isomorphisme, c'est-à-dire que chaque élément du domaine de départ ait une et une seule image dans l'ensemble d'arrivée.

Cette notion d'isomorphisme nécessaire et fondamentale à la construction d'un morphisme inverse est cruciale, car, en théorie des catégories, deux objets peuvent être considérés comme identiques à un isomorphisme près et peuvent, par conséquent, être utilisés indifféremment l'un pour l'autre. L'isomorphisme, par le fait que tout élément du domaine de départ n'a qu'une et une seule image dans le domaine d'arrivée, est un morphisme qui maintient la structure de l'ensemble de départ, et dont l'inverse maintient également la structure de l'ensemble d'arrivée. Deux ensembles liés par un isomorphisme sont donc identiques dans leur structure. De ce fait, dans le cas qui nous occupe, une association est possible, en termes catégoriels, entre l'ensemble B appartenant à l'ensemble $H(H(B, H(A, B)), H(A, B))$, dont b , fait partie, et l'ensemble de morphismes $H(H(A, B), H(B, H(A, B)))$, dont β , c'est-à-dire \hat{b}^{-1} , fait partie. Correspondance qui autorise de remplacer le morphisme β par l'élément b , puisqu'ils font tous deux partie d'ensembles identiques à un isomorphisme près. Et ceci nous amène au coup de maître de Rosen, qui fait de l'approche relationnelle en biologie une véritable innovation aboutissant à une proposition originale de définition du vivant. En effet, en identifiant β avec b , le schéma d'un (M,R)-Système avec lequel nous travaillions devient :

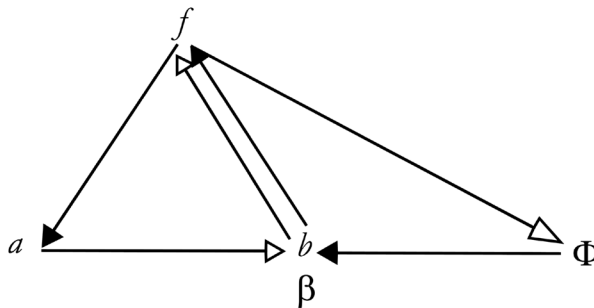


Fig. n°10.
Identification de β et de b .

Source : composition personnelle à partir de Rosen (1991).

Et cette dernière figure nous montre que tous les éléments présents dans le modèle ont une explication causale au sein même du système. En effet, à part l'élément a dont nous avons déjà dit qu'il provenait de l'environnement, tous les éléments sont le résultat d'un ensemble de causes au sens aristotélicien du terme. Ils sont tous causés de façon efficiente dans le système. Bref, nous sommes en présence de trois processus s'intercausant. Le premier processus, appelé *métabolisme*, est représenté par le morphisme $f: a \rightarrow b$. Le deuxième, le processus de *réparation*, a pour résultat le premier morphisme, il en est la cause efficiente : $\Phi: b \rightarrow f$. Et le dernier, que nous venons de présenter ici et qui est nommé *réplication*, clôture la boucle causale, en causant le morphisme de réparation : $b: f \rightarrow \Phi$. Cette clôture causale peut se représenter graphiquement par le diagramme suivant :

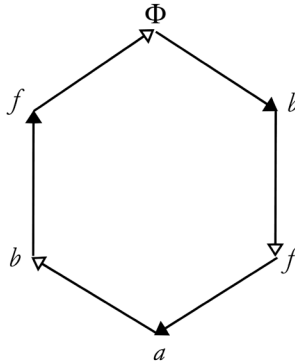


Fig. n°11.

Diagramme circulaire du (M,R)-Système.

Source : composition personnelle à partir de Louie (2009).

Dans ce diagramme, les éléments b et f sont chacun présents deux fois, mais comme signalé plus haut, ils n'ont pas la même fonction dans les deux cas. En effet, ils sont présents tantôt en tant que cause matérielle, c'est-à-dire qu'ils se situent, dans le schéma, à la fin d'une flèche pleine, tantôt en tant que cause efficiente, à la fin d'une flèche vide, et en même temps en tant que cause efficiente d'un nouveau processus en se situant au début d'une flèche pleine.

Nous nous retrouvons avec un diagramme circulaire, représentant trois morphismes s'inter-causant. C'est le résultat auquel aboutit Rosen et qui, pour lui, permet de décrire les organismes vivants.

6. Une définition systémique du vivant

Nous avons présenté au début de cet article la motivation derrière le travail de Robert Rosen : construire un modèle des organismes vivants, permettant de rendre compte de leur spécificité en tant que système tout en incluant leur diversité. Cela rejoint ma volonté de comprendre ce que partagent mon chat et ma plante, malgré leur grande diversité de nature et de fonctionnement. L'utilisation de la théorie des catégories a permis l'abstraction nécessaire à une vision globale des vivants en tant que systèmes, possédant les trois mêmes fonctions, susceptibles d'expressions différentes.

Cela amène Rosen à proposer une définition du vivant : c'est un système matériel clos sous causation efficiente (Rosen, 1991, p. 244. Notre traduction). Cette définition ressort de la lecture du diagramme relationnel présenté ci-dessus à la figure 11. En effet, les trois processus, s'appliquant initialement à des éléments externes, provenant de l'environnement, sont causés de manière efficiente au sein du diagramme. Les trois éléments représentant cette causalité efficiente — f, b et Φ — sont causés au sein du système et s'expliquent par l'organisation de celui-ci. Cette clôture causale assure l'autonomie des systèmes vivants.

Ce dernier point est particulièrement important. En effet, une clôture causale est très difficile à défendre, surtout avec la difficulté que l'on peut avoir de se départir d'une conception moderne de la causalité. Retourner à Aristote est nécessaire et la théorie des catégories nous aide à prendre la distance indispensable pour penser cette causalité. Sans la causalité aristotélicienne, on ne peut défendre sérieusement une clôture causale, et sans la théorie des catégories, on ne peut la penser et la formaliser rigoureusement. En mettant l'accent sur les relations, donc les flèches, cette théorie mathématique permet de se focaliser sur l'organisation des systèmes vivants, qui leur est commune, en laissant de côté la matière qui les constitue, qui peut être très diversifiée⁹.

Pour Rosen, un système matériel sera donc considéré comme vivant s'il peut être modélisé par un (M,R)-Système : une organisation de trois morphismes représentant des fonctions, fermée sous causation efficiente. Autrement dit, ce système possède une fonction métabolique, causée par une fonction de réparation, elle-même causée par une fonction de réplication, dont le métabolisme est la cause efficiente. Et il n'est nul besoin de connaître la nature des éléments

9. Ré-interprétation d'une phrase de R. Rosen dans *Life Itself*: « *throw away the matter and keep the underlying organization* » (p. 119).

matériels remplissant ces fonctions, puisque l'approche réductionniste, centrée sur la biologie moléculaire et la chimie organique, n'est pas nécessaire pour appréhender la spécificité du vivant.

Rosen ne nie cependant pas que les approches réductionnistes, majoritaires dans la biologie contemporaine, puissent donner des informations très importantes sur le fonctionnement et la structure des organismes vivants. Mais toutes ces informations, même mises bout à bout, ne peuvent rendre compte de la vie comme propriété d'un système. L'approche réductionniste est une manière d'étudier le vivant qui le ramène à un système mécanique. Cette approche ne peut que manquer d'appréhender la vie, puisque, de toute évidence, les organismes possèdent une autonomie et une organisation propre, deux caractéristiques essentielles qu'une approche relationnelle peut correctement représenter, modéliser et formaliser, grâce à la notion de (M,R)-Système.

Comment tout cela peut-il se traduire dans les êtres vivants singuliers que sont mon chat et ma plante, à l'origine de ma réflexion ? Que sont ces trois morphismes, ces trois fonctions dans un petit corps poilu ou un autre feuillu ? Nous avons suivi un chemin de pensée qui nous a mené dans le monde de la formalisation et de l'abstraction. Ce chemin fut nécessaire car sans lui l'idée centrale de l'importance des relations et de leur clôture causale n'aurait pu être rendue aussi rigoureusement. Comment retourner de ce modèle formel et abstrait à la réalité corporelle et matérielle que sont les êtres vivants ? Cette difficulté n'est pas anecdotique et fut d'ailleurs également celle de Rosen, qui la qualifiait de « problème de la réalisation du (M,R)-Système » (Rosen, 1985) : comment ce modèle abstrait peut-il se réaliser effectivement dans un organisme vivant singulier ?

Il est important de rappeler que les morphismes du (M,R)-Système représentent des processus, des fonctions, et pas des éléments matériels comme des organes par exemple. Le morphisme *métabolisme* regroupe donc un ensemble de fonctions s'appliquant sur des éléments extérieurs au système et les transformant en matière ou en énergie utilisable par le système : par exemple, les fonctions d'ingestion et de digestion chez mon chat. Pour la fonction *réparation* et celle de *réplication*, l'affaire se corse. Il s'agit de trouver une fonction, ou un ensemble de fonctions, responsable de l'ensemble de fonctions métaboliques, et une autre expliquant cette première fonction. L'une des hypothèses proposées par d'autres biologistes, à la suite des travaux de Rosen est qu'il faut lire la cause efficiente, l'action des morphismes, comme une action catalytique, assurée par des enzymes (Letelier *et al.*, 2006). Les enzymes produites par l'organisme à partir d'éléments extérieurs rendent en effet possibles, dans le même temps,

les fonctions métaboliques capables de les créer. Si cette hypothèse est exacte, un organisme est donc bien la réalisation d'un (M,R)-Système : un système capable de transformer de la matière et de l'énergie, provenant de son environnement, en d'autres formes de matières et d'énergies permettant d'entretenir le système, d'assurer son maintien et son autonomie.

7. Conclusion

En adoptant ce chaton, je m'attendais à des griffes, des ronronnements, quelques vomis et beaucoup d'amour, mais certainement pas à me laisser emporter dans un voyage abstrait et mathématique tel que celui que nous venons d'entreprendre. Partir du quotidien pour tenter de comprendre le général et l'universel est le propre de la pratique scientifique, et réfléchir sur les causes, les conséquences et les impensés de cette pratique est ce qui caractérise une pratique philosophique.

Nous avons ici navigué entre modélisation mathématique et explicitation philosophique de ce mouvement de modélisation. Grâce aux travaux de Rosen et d'autres biologistes relationnels, nous avons pu nous plonger profondément dans l'analyse de ce qui caractérise aussi bien un chat, une plante, que l'être humain qui leur parle et les nourrit. Tous ces êtres partagent une organisation commune, close sous causation efficiente et formalisable grâce à des outils mathématiques : le (M,R)-Système. Il nous a fallu, pour cela, prendre le chemin de la théorie des catégories et de son pouvoir d'abstraction, considérablement rigoureux au point de représenter de manière cohérente les quatre types de causes aristotéliennes et de montrer l'auto-causation efficiente des systèmes vivants. L'abstraction de cette organisation de relations entre fonctions nous permet de nous défaire de considérations réductionnistes, certes enrichissantes pour l'étude du vivant, mais qui ne peuvent que manquer d'en cerner la singularité. Mon chat et ma plante ne sont pas que des agglomérats d'atomes ou des réseaux d'informations génétiques. S'en tenir à l'analyse de leur composition n'est pas suffisant pour comprendre ce qui les rend vivantes.

Grâce à cette approche du vivant, je peux caractériser mon chaton comme vivant sans qu'il ne se soit déjà reproduit — et sans qu'il ne le fasse jamais — et donc sans que l'on puisse lui attribuer les caractéristiques d'une évolution darwinienne. L'individu que j'ai face à moi est vivant, tout comme la plante qu'il prend un malin plaisir à mordiller, car ce sont tous deux des systèmes matériels clos sous causation efficiente — ce que ne sont ni la table ni l'ampoule

auxquelles je les ai comparés. Ces êtres sont vivants, car ils possèdent en eux les causes de leur propre maintien.

Négliger la nature des éléments matériels qui composent les êtres vivants et se centrer sur leur organisation pourrait avoir des conséquences encore plus riches. Cela invite en effet à se demander si des formes de vie non terrestres, éventuellement constituées d'éléments totalement différents de ceux que l'on connaît sur Terre, ne répondraient pas à cette même organisation de relations. Peut-être que mon chat partage avec E.T. plus que le fait d'être mignon...

8. Pour aller plus loin

La biologie relationnelle de Rosen a peu été comprise et réutilisée par d'autres biologistes, mais quelques personnes ont cependant poursuivi ses réflexions. L'une d'elles est son élève, A. H. Louie, qui a approfondi le formalisme développé par Rosen (dans un ouvrage majeur, *More Than Life Itself*, 2009) et qui l'a appliqué dans d'autres domaines de réflexions du vivant, comme la symbiose par exemple (Louie, 2010, *Relational Biology of Symbiosis*).

D'autres travaux contemporains s'inspirent de ceux de Rosen pour discuter du caractère calculable (*computable*) de la caractéristique principale des organismes vivants, la clôture sous causation efficiente. En effet, Rosen affirme de nombreuses fois que la clôture causale n'est pas calculable et que cela pose une ligne de démarcation entre les organismes et les machines (mais qui n'exclut tout de même pas une possibilité de création artificielle de la vie). Voir par exemple les travaux de Matteo Mossio *et al.* (2009, *A Computable Expression of Closure to Efficient Causation*) ainsi que ceux de Maria Luz Cardenas *et al.* (2010, *Closure to Efficient Causation, Computability and Artificial life*).

Des philosophes francophones ont également porté de l'intérêt à la biologie relationnelle, comme Franck Varenne dans son ouvrage *Formaliser le vivant* (2010), et Gilbert Lechermeier dans *Le vivant : la singularité et l'universel* (2019). On peut trouver dans ces deux ouvrages une approche claire et contextualisée de la biologie relationnelle.

Bibliographie

- Aristote (2012). *La physique* (trad. A. Stevens). Paris : Vrin.
- Beauzée, N. (1767), *Grammaire générale ou Exposition raisonnée des éléments nécessaires du langage, pour servir de fondement à l'étude de toutes les langues* (tome II). Paris : Barbou.
- Càrdenas, M. L., *et al.* (2010), Closure to Efficient Causation, Computability and Artificial Life, *Journal of Theoretic Biology*, 263, 79-92.
- Cleland, C.E., & Chyba C.F. (2002). Defining 'Life'. *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 32, 387-393.
- Eilenberg, S., & MacLane, S. (1945). General Theory of Natural Equivalences. *Transactions of the American Mathematical Society*, 58 (2), 231-294.
- Jeangène Vilmer, J.-B. (2011), *L'éthique animale*. (Que sais-je ?). Paris : PUF.
- Joyce, G. F. (1994). Avant-propos. Dans D.W. Deamer & G.R. Fleischaker (eds.), *Origins of Life : The Central Concepts* (pp. XI-XII). Boston : Jones & Bartlett.
- Koyré, A. (1973). *Du monde clos à l'univers infini*. Paris : Gallimard.
- Lawvere, F.W., & Schanuel, S.H. (1997). *Conceptual Mathematics : A First Introduction to Categories*. Cambridge : Cambridge University Press.
- Lechermeier, G. (2019), *Le vivant : la singularité et l'universel*. Paris : Éditions Maté-riologiques.
- Letelier, J.-C., *et al.* (2006). Organizational invariance and metabolic closure : Analysis in terms of (M, R)-systems. *Journal of Theoretical Biology*, 238, 949-961.
- Louie, A.H. (2009). *More Than Life Itself: A Synthetic Continuation in Relational Biology*. Frankfurt : Ontos Verlag.
- Louie, A.H. (2010). Relational Biology of Symbiosis. *Axiomathes*, 20, 495-509.
- Mikulecky, D.C. (2001). Robert Rosen (1934-1998) : A Snapshot of Biology's Newton. *Computer and Chemistry*, 25, 317-327.
- Mossio, M., *et al.* (2009), A Computable Expression of Closure to Efficient Causation. *Journal of Theoretical Biology*, 257, 489-498.
- Rosen, R. (1959). A Relational Theory of Biological Systems II. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 21, 109-128.
- Rosen, R. (1966). A Note on Replication in (M,R)-Systems. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 28, 149-151.
- Rosen, R. (1985). Organisms as Causal Systems Which are not Mechanisms : An Essay into the Nature of Complexity. Dans R. Rosen (eds.), *Theoretical Biology and Complexity : Three Essays on the Natural Philosophy of Complex Systems* (pp. 165-203). London : Academic Press.
- Rosen, R. (1991). *Life Itself: A Comprehensive Inquiry into the Nature, Origin, and Fabrication of Life*. Cambridge : Cambridge University Press.
- Varenne, F. (2010), *Formaliser le vivant*. Paris : Hermann.
- Viennot, E. (2018). *Le langage inclusif : pourquoi, comment*. Paris : Éditions iXe.

