



HAL
open science

Définition du vivant et émergence de la vie : entre rupture et continuité, saisir l'originalité du vivant

Gilbert Lechermeier

► **To cite this version:**

Gilbert Lechermeier. Définition du vivant et émergence de la vie : entre rupture et continuité, saisir l'originalité du vivant. Philosophie. Université Panthéon-Sorbonne - Paris I, 2015. Français. NNT : 2015PA010536 . tel-01403361

HAL Id: tel-01403361

<https://theses.hal.science/tel-01403361>

Submitted on 25 Nov 2016

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.

Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne

École Doctorale de Philosophie

N°d'attribution par la bibliothèque :

THÈSE

pour l'obtention du grade de

Docteur en Philosophie de l'Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne

Présentée et soutenue publiquement le 15 juin 2015 par

Gilbert LECHERMEIER

**Définition du vivant et émergence de la vie :
entre rupture et continuité, saisir l'originalité du vivant**

Sous la direction de

**Michel MORANGE, Professeur à l'École Normale Supérieure de Paris
et de
Philippe HUNEMAN, Directeur de Recherche au CNRS.**

Composition du jury :

Philippe Huneman, Directeur de Recherche au CNRS,
Marie Christine Maurel, Professeur à l'Université Pierre et Marie Curie,
Michel Morange, Professeur à l'École Normale Supérieure de Paris,
Matteo Mossio, Chargé de Recherche au CNRS,
Stéphane Tirard, Professeur à l'Université de Nantes,
Charles T. Wolfe, Attaché de Recherche à l'Université de Ghent.

Année universitaire 2015

Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu Michel Morange qui a bien voulu assurer la direction de ce travail et me consacrer une partie de son temps.

Ce travail n'aurait pu aboutir sans les conseils de Philippe Huneman. Ses remarques et analyses pertinentes ont été précieuses et m'ont permis de mieux cerner un thème de travail foisonnant.

J'ai été accueilli à l'Institut d'Histoire et de Philosophie des Sciences d'abord par Jacques Dubucs après mon M2, puis par son directeur actuel Jean Gayon. Ils ont su créer un environnement propice au développement des recherches en philosophie des sciences dont j'ai pu tirer profit pour le bon avancement de mon travail.

Il convient donc que je remercie sur un plan général, l'institution universitaire qui m'a permis de renouer avec des travaux de recherche. Après avoir côtoyé le monde de la recherche scientifique, celui de la chimie notamment en menant à bien une thèse sur les matériaux macromoléculaires suivi d'une longue parenthèse au sein d'une direction technique de l'administration puis au sein du monde de l'entreprise, j'ai pu renouer avec l'activité de recherche cette fois ci sur le plan de l'analyse et de la compréhension des démarches et méthodes développées au sein des sciences de la vie. Je tiens donc à rendre hommage à tous les enseignants, débutants ou chercheurs confirmés, qui ont su me transmettre la curiosité et l'ouverture à une discipline intellectuelle et qui m'ont permis d'appréhender au sein de l'Université Paris 1, de l'IHPST un champ de réflexion nouveau pour moi : la philosophie des sciences.

La participation aux séminaires organisés par cet institut, par le centre Cavallès, les discussions bienveillantes avec des membres de l'IHPST, de jeunes doctorants, sans oublier les proches intéressés par mes travaux, m'ont permis de finaliser et donner consistance à des approches qui au départ étaient encore bien flou.

Enfin, je tiens à remercier chaleureusement tous ceux qui m'ont aidé dans l'élaboration de cette thèse, les proches qui ont consacré un temps précieux aux relectures et à sa remise en forme. Ce travail a permis de transformer un document brut en un ouvrage –ce que j'espère– plus aisé à aborder et à lire.

Définition du vivant et émergence de la vie : entre rupture et continuité, saisir l'originalité du vivant

Comment caractériser le vivant dans le cadre scientifique tel qu'il se pratique et partant, identifier les contraintes et limites épistémiques qui rendent si délicate la théorisation d'un système matériel doté des propriétés que nous qualifions de vitales ? Pour y répondre nous nous proposons de mener une enquête au cœur des propositions de définitions de la vie, de leur inscription dans les thématiques qui courent tout au long de l'histoire de la pensée philosophique et scientifique. Elle introduira une analyse détaillée d'approches centrées sur des modèles théoriques du vivant, représentation globale de ces systèmes matériels originaux.

Definition of living being and emergence of life: between continuity and breaks, grasping the novelty of living beings

How to characterize the living beings in the scientific framework as it is practiced, and thereby, identify the constraints and epistemic limits which make tricky the theorization of a physical system which has the properties that we call vital? To answer we propose to conduct an investigation at the heart of various proposals of definitions of life, their connections with themes that runs throughout the history of philosophical and scientific thought. It will introduce a detailed analysis of some approaches centered on theoretical models of the living as global representation of these peculiar material systems.

Discipline : Philosophie

Mots clefs : vie, vivant, themata, modèles, définition, Rosen, Gánti, Eigen, émergence, philosophie de la biologie.

SOMMAIRE

PLAN SYNOPTIQUE	12 -
INTRODUCTION GENERALE	13 -
1. DEFINIR LA VIE, QUELS ENJEUX?	22 -
1.1 Quelle actualité, quels enjeux autour de la définition de la vie	23 -
1.1.1 Les développements des sciences de la vie autour de la biologie se sont réalisés sans faire d'une définition du vivant ou de la vie un enjeu central d'investigation.....	23 -
1.1.2 Actualité contemporaine	27 -
• Le vivant et ses cas limites	29 -
• Exobiologie	31 -
• Origines de la vie	33 -
• Vie artificielle	35 -
• Biologie synthétique.....	38 -
• Biologie théorique	41 -
1.2 Définitions de la vie : essais de mise en perspective	43 -
1.2.1 Que reflète la pluralité des essais répétés de définition de la vie ?	43 -
• La vie au carrefour de différences essentielles constitutives.....	45 -
• Le phénomène vivant caractérisé par ses propriétés : un air de famille constitué autour de collections et combinaisons de propriétés	49 -
• La vie, attribut d'un agrégat particulier de la matière.....	54 -
• De l'agrégat de matière au « tout » de l'organisme : la spécificité du vivant comme système d'intégration.	58 -
• Les dynamiques de la vie.....	65 -
1.2.2 Définitions de la vie et incidence des cadres de théorisation employés.....	67 -
• Essais d'identification de liens causaux, les définitions listes (ou pseudo définitions) : une théorie du vivant en filigrane	69 -
• Définitions et recours à des concepts issus d'autres champs disciplinaires : problèmes et sources d'interrogations nouvelles.	74 -
1.3 Définir la vie dans les sciences de la vie : à la recherche d'une théorie du propre du vivant	87 -
1.3.1 Retour sur les problématiques définitionnelles.	87 -
1.3.2 Définition de la vie : autour du propre des vivants.....	95 -

- Passer d'une définition courante à une définition scientifique de la vie... - 96 -
 - Questions corrélatives à la définition de la vie comme propriété d'une organisation matérielle singulière - 112 -
- 1.3.3 Vers une compréhension de la vie ? Les thématiques sous-jacentes..... - 125 -

2. LES THEMATIQUES RECURRENTES AUTOUR DU PROPRE DU VIVANT - 130 -

2.1 Le propre du vivant : questionner l'essence de la vie - 133 -

2.1.1 Le vivant dans l'opposition vie, non-vie - 134 -

- La vie donnée première organise le monde en animé et non animé - 134 -
- L'âme entre transcendance et immanence - 135 -
- La vie, déclinaison particulière d'un regroupement d'atomes - 137 -

2.1.2 La vie entre physique singulière et physique commune : la vie principe transcendantal versus la vie comme propriété résultante - 138 -

- La vie s'oppose à la matière par des principes ou des lois qui lui sont propres - 138 -
- Le substrat de la vie : entre matière propre et matière commune. - 142 -
- Vie immanente et vie résultante du jeu de forces opposées. - 147 -

2.1.3 L'organisation, propriété singulière des êtres dotés de vie - 152 -

- La machine vivante. - 153 -
- La machine ajustée pour accueillir la vie - 154 -
- L'organisation oriente le jeu des lois physiques. - 157 -

2.1.4 Histoire des vivants, histoire du vivant, entre phylogenèse et ontogenèse : des temporalités singulières. - 159 -

- Reproduction et développement..... - 160 -
- Fixité et évolution. - 164 -

2.2 Saisir le vivant : les schèmes d'intelligibilité..... - 169 -

2.2.1 Constitution de l'ordre du vivant. L'unité du vivant à travers l'histoire naturelle ... - 170 -

- Point de repère : l'unité du monde des vivants autour du propre du vivant... - 170 -
- Vers un ordre biologique..... - 172 -
- L'unité et sa déclinaison au sein du vivant diversifié. - 175 -

2.2.2 De l'expérience à l'expérimentation. - 179 -

2.2.3 Connaître le vivant à travers sa décomposition. - 183 -

2.2.4 Le mécanisme support d'intelligibilité, l'organisation comme spécification matérielle de sa mise en œuvre..... - 186 -

- Autour du mécanisme en général. - 187 -

•	Vers un mécanisme spécial.....	- 192 -
2.2.5	De l'ordre minéral à l'ordre vivant : comment penser la genèse du vivant.....	- 194 -
2.3	Conclusion : les axes d'interrogations et d'explorations dans les sciences de la vie..	
	- 198 -
•	La vie, l'être vivant, donnée première constitutive de l'ordre de la Nature	- 198 -
•	L'opposition vivant/non vivant autour de la spécificité du phénomène de la vie.	- 200 -
•	Vie, matière, organisation.....	- 202 -
•	Le temps grand ouvrier de la nature.	- 204 -
•	Saisir le vivant : l'observer, l'analyser, expliquer : nécessité de la réduction et du mécanisme.....	- 206 -
3.	LES MODELES DU VIVANT :	- 216 -
3.1	Rosen : « Life it self » ou la vie <i>per se</i>.....	- 219 -
3.1.1	Le propre de l'organisme vivant : la clôture sur cause efficiente.....	- 224 -
•	Présentation succincte du modèle relationnel formel des organismes : le système M, R ou « Métabolism and Repair. »	- 225 -
•	Formulation littérale.	- 229 -
•	Remarques concernant ce modèle relationnel : propriétés intrinsèques au système matériel, causes extrinsèques, finalités.	- 231 -
3.1.2	La théorisation de l'organisme vivant par Rosen : concepts et contextes de théorisation.....	- 232 -
•	La biologie relationnelle pour un modèle relationnel de l'organisme.....	- 232 -
•	Causes efficientes, causes matérielles, causes finales chez Rosen : Causalité et distinction des plans de détermination.....	- 236 -
•	Théorie des catégories, diagrammes de blocs et représentation des déterminations causales.....	- 237 -
3.1.3	Le modèle « M, R » et son exploitation en biologie.	- 245 -
3.1.4	Questions philosophiques autour du modèle « M,R ».	- 248 -
•	Mécanisme, machines et organisme.....	- 248 -
•	Modèles, Lois, simulations.....	- 254 -
•	Causes	- 259 -
•	Ontologie du vivant, essence de la vie, définitions.	- 261 -
•	Penser l'émergence du vivant.....	- 264 -

3.2 L'automate fluide (le <i>Chemoton</i>) de Tibor Gánti	- 266 -
3.2.1 Le système vivant minimal : le <i>chemoton</i>	- 268 -
• Présentation qualitative	- 269 -
• Schéma représentant le modèle du chemoton, idéalisation d'un système vivant minimal	- 270 -
• Fonctionnement du chemoton. (Résumé)	- 273 -
3.2.2 Le système vivant minimal : concepts et contextes de théorisation	- 275 -
• Les critères de vie	- 276 -
• Théorie des systèmes	- 281 -
• La chimie support d'informations	- 284 -
• Machines chimiques et thermodynamiques	- 284 -
3.2.3 Le <i>chemoton</i> et son rapport avec la réalité saisie par les sciences de la vie	- 287 -
• Le chemoton comme modèle unifiant un ensemble de modèles naturels	- 287 -
• Les sciences de la vie et le système vivant minimal	- 289 -
• Ancrage des systèmes auto catalytiques dans la réalité chimique	- 294 -
• Cycles auto-catalytiques et analogons chimiques des sous-systèmes	- 295 -
3.2.4 Le <i>chemoton</i> objet philosophique	- 296 -
• Définition de la vie et unité individuelle	- 296 -
• Chemoton et origine de la vie	- 298 -
3.3 Autour des hyper cycles, le modèle d'une organisation matérielle nécessairement évolutive	- 311 -
3.3.1 Deux niveaux de modélisation : du cycle auto catalytique à l'hypercycle	- 313 -
• Catalyse et cycles catalytiques : application à des unités auto-répliquatives	- 313 -
• Auto-organisation de la matière à partir d'unités auto-répliquatives : phénoménologie	- 314 -
• Du cycle catalytique vers l'hyper cycle, un nouveau niveau d'organisation permettant de dépasser le paradoxe d'Eigen : pas de grand génome sans protéines, pas de protéines sans grand génome	- 324 -
3.3.2 Cycles, hyper cycles et auto-organisation de la matière : vers le scénario d'une réalité possible	- 330 -
• Les origines possibles d'un système coopératif de réplication et de traduction	- 330 -
• La chimie prébiotique	- 332 -
• Le scénario d'une évolution possible vers le vivant	- 334 -
• La sortie du chaos originel	- 342 -
3.3.3 Le modèle, support d'une histoire évolutive de la matière	- 343 -

- La modélisation au service d'une histoire - 344 -
- Quelle définition de la vie ? - 351 -

3.4 Modèles : ce qu'ils nous apprennent sur la compréhension du vivant..... - 353 -

- 3.4.1 Modèles. - 353 -
- 3.4.2 Modèles du vivant et définitions de la vie - 360 -
- 3.4.3 Dynamiques temporelles, émergence de la vie - 366 -
- 3.4.4 Conclusion de cette partie : la singularité du vivant..... - 370 -

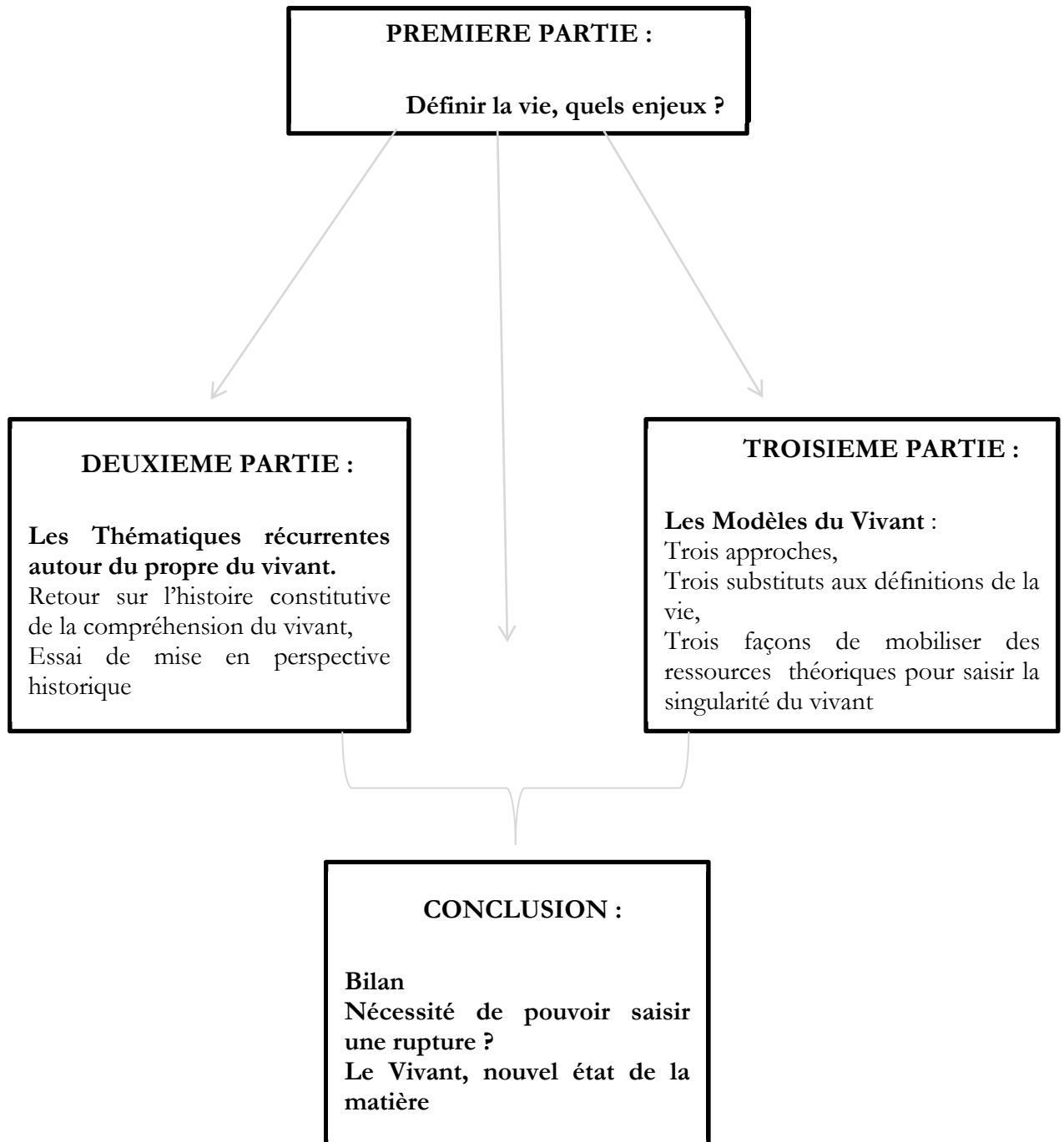
CONCLUSION - 373 -

RÉFÉRENCES - 387 -

FIGURES ET TABLEAUX

Concevoir une vie minimale	- 120 -
Vie comme principe vital, vie comme résultante	- 152 -
Récapitulatif des thèmes	- 211 -
La modélisation selon Rosen.....	- 255 -
Le modèle du <i>chemoton</i>	- 270 -
Cycle autocatalytique : graphe des relations.....	- 314 -
Hypercycle : graphe des relations entre polynucléotides et polypeptides	- 327 -
D'une simple macromolécule à une cellule intégrée	- 340 -
Enseignements tirés des modèles.....	- 360 -

Plan Synoptique



Introduction générale

La théorisation de la singularité du vivant comme système matériel doté des propriétés qualifiées de vitales demeure une question délicate. En effet comment caractériser dans la démarche scientifique telle qu'elle se pratique ce qui fonde le vivant ? Et partant de cette difficulté initiale, comment identifier les contraintes et limites épistémiques qui rendent ardue tout effort de théorisation globale et unifiée.

Il s'agit en somme de saisir la singularité du vivant en tant qu'objet matériel tout en l'inscrivant dans le monde physique avec lequel il échange matière et énergie. Cette démarche semble poser un double problème. C'est d'abord pouvoir penser la genèse de ces systèmes matériels à partir d'environnements non animés (pré-biotique ou antébiologique) et ensuite pouvoir y repérer ce qui sur le fond les distingue des autres systèmes matériels. C'est donc vouloir appréhender le vivant dans ce qui le constitue en propre.

En définitive, il s'agit de pouvoir énoncer, au-delà de la recension la plus exhaustive possible des traits caractérisant toutes les espèces vivantes, « ce » qui préside à la communauté de propriétés qui justifie de rassembler dans un même ensemble *Escherichia coli*, lichens, amibes, orchis, animaux etc. et dans le même geste théorique fonder ainsi la différence fondamentale entre ces entités vivantes et tout autre système matériel.

Cette recherche s'inscrit *de facto* dans un corpus de pensée nourri des apports, des connaissances et démarches scientifiques disponibles. Dans ce contexte, les sciences de la vie constituent tout naturellement l'axe fédérateur d'une approche ouverte aux apports de disciplines et démarches théoriques plus connexes. (Théorie des systèmes, thermodynamique etc.)

La problématique s'énonce ainsi : pouvoir recourir aux mêmes lois physico-chimiques qui rendent compréhensible la matière sur un plan fondamental pour saisir, selon des modalités propres, ce qui constitue la spécificité ou le propre des systèmes vivants. En l'état actuel de cette recherche il s'agit d'un véritable défi car, en l'absence d'une théorie unifiée de la vie, elle ne restitue qu'une vision parcellisée, émiettée de la

nature du vivant. Et cette absence de démarche unifiée au sens où elle s'appliquerait tout autant aux objets inanimés qu'animés ne permet pas, pour l'instant, d'expliquer en partant de ces lois physico-chimiques fondamentales la formation d'entités dotées des propriétés que nous appelons vitales ainsi que de rendre compte sur le même plan scientifique de ce qui constitue de façon irréductible la caractéristique de l'être vivant.

Il y a là deux dimensions à prendre en compte qui, sans être opposées, participent de points de vue différents.

La première, que l'on pourrait qualifier de philosophique, interroge les concepts même de vie, de vivant, tels qu'ils se donnent dans le vocabulaire courant, le vocabulaire des sciences, pour reposer la question de l'ontologie de l'entité vivante : matérielle ? Matérielle plus un petit quelque chose d'autre ? Réelle comme partie intégrante des entités constitutives du monde, de la nature, en principe explicable moyennant de possibles biais liés à nos capacités cognitives ?

L'autre dimension, que l'on peut qualifier de scientifique vise à caractériser les vivants. Elle s'attelle à traiter de la vie, des phénomènes vivants, des structures et systèmes vivants, des organismes, en mettant en œuvre les pratiques et méthodes des sciences. Cette approche recourt à des termes qui renvoient aux concepts de vie, du vivant de façon pragmatique et adaptée aux contextes théoriques et pratiques mis en œuvre. Démarche scientifique qui permet ainsi de s'insérer dans des contextes d'énonciations riches et diversifiés, propres aux besoins de communication spécifiques à chaque acteur scientifique.

De facto dans cette approche, on part de la vie, du vivant comme d'un donné naturel de l'environnement de travail. Il n'y a pas, alors, besoin de définir ces concepts au-delà de strictes nécessités communicationnelles. Ils suffisent à rendre compte des modalités phénoménologiques, fonctionnelles, structurelles, matérielles de la grande diversité du vivant terrestre.

Pourtant au-delà de cette grande richesse descriptive allant du plus élémentaire mis en lumière par la biochimie (les composés macromoléculaires), de leur organisation et leur fonctionnement en réseau, jusqu'aux grandes fonctions et propriétés de bases des systèmes vivants : métabolisme, reproduction, homéostasie, hérédité, subsiste une interrogation : qu'est ce qui fait qu'une telle entité matérielle, le vivant, possède ces

propriétés remarquables ? En somme pourquoi est-elle vivante ?

La réponse à cette question était traditionnellement du domaine des conjectures non scientifiques, élaborée à l'aune de la recherche de causes extra-mondaines (de type divines ou surnaturelles), en dehors de l'univers matériel tel que les différentes disciplines scientifiques le constituaient.

On pouvait, dès lors, délimiter un partage des rôles aux frontières mouvantes : aux sciences et notamment à la biologie, la charge de répondre aux questions relevant du « comment cela fonctionne » ; au champ extrascientifique celle des mythes fondateurs ou encore des spéculations hasardeuses pour répondre à la question : « pourquoi y-a-t-il de la vie ? » et pourquoi « telle chose est-elle vivante ? ». Tenter de répondre à ces questions restait aventureux, car renvoyant aux causes ultimes des choses ou aux finalités du monde.

Deux préoccupations d'ordre scientifique ont cependant modifié cette répartition des rôles.

La première, née au 19^{em} siècle, s'appuie sur la puissance explicative fournie par les approches évolutionnaires du monde vivant. Grâce à la théorie générale de l'évolution elles procurent une cohérence au foisonnement des êtres vivants. Cette théorie renvoie *in fine* à des interrogations concernant l'origine naturelle des êtres vivants.

La seconde est liée à l'élargissement du regard connaissant de l'humanité, jalonné par ses avancées théoriques qui autorisent d'embrasser l'univers dans son entier, par les performances techniques mises en œuvre pour l'explorer, et qui conduit nécessairement à poser la question du degré d'universalité de la vie pour en retour stimuler l'approfondissement de notre compréhension du vivant terrestre.

C'est donc également sur le plan scientifique que les principes qui régissent cette structure matérielle qualifiée de vivante doivent être recherchés. Car c'est bien de cela dont il s'agit : naturaliser la formation et la persistance du « vivant » à partir des instruments théoriques développés dans le cadre des différentes approches scientifiques de la vie, en visant une compréhension unifiée, commune à l'ensemble des disciplines scientifiques concernées.

Les réflexions dans ce domaine sont nombreuses : des revues dédiées permettent aux équipes scientifiques d'exposer leurs avancées, des forums spécialisés constituent des

lieux d'échanges fructueux.¹

En parallèle, des travaux philosophiques ont permis de clarifier les questions relatives à la compréhension de la vie, mais sans apporter de réponse unifiée, en se bornant à identifier les problèmes posés.²

Cet aspect nous semble être emblématique de l'état de notre approche du phénomène vivant. Il constitue en somme la « pierre de touche »³ de notre compréhension (scientifique) de la vie. Le nombre de définitions rencontrées dans la littérature scientifique, leurs variations en rapport avec leurs contextes scientifiques, sont à cet égard révélateurs à la fois d'une grande richesse d'approches (non plus seulement cantonnées à la biologie mais mobilisant également des domaines spécialisés de la physique, de la chimie etc.) qui conduisent à des définitions de la vie incorporant de plus en plus d'apports divers. Mais ils sont également la conséquence de faiblesses, voire d'impasses théoriques qu'il convient de questionner.

Ainsi si on part d'une des définitions de la vie la plus récente : « une entité vivante est tout système autonome possédant des capacités évolutives sans limites »⁴, assertion qui porte l'ambition d'une définition universelle de la vie, celle-ci doit être accompagnée de commentaires explicitant le sens et le contexte d'expression des propriétés énoncées :

a : « par *autonomie* il faut entendre celle d'un système qui loin de l'équilibre (thermodynamique), se forme et se maintient en vertu de ses capacités propres, constituant ainsi son identité organisationnelle. Ce système forme une unité fonctionnellement intégrée (active, homéostatique) basée sur un ensemble de réactions *endergoniques* et *exergoniques* entre processus internes et des processus d'interactions avec

¹ A titre d'exemples: la revue *Origin of Life and Evolution of the biosphere*; l'association: European Astrobiology Network Association.

² Gayon Jean, *Defining Life: Synthesis and conclusions. Origin of Life and Evolution of the Biosphere*, 2010, 40

³ Le Larousse donne cette définition : « variété de jaspe noir qui servait à essayer l'or au toucheau ; ce qui sert à connaître la valeur de quelqu'un, de quelque chose ; test, critère. »

⁴ Traduction libre de: "*a living being is any autonomous system with open-ended evolutionary capacities*" ainsi que des explicitations accompagnant la définition proposée par : Ruiz-Mirazo Kepa, Peretó Juli and Moreno Alvaro, A universal definition of life : autonomy and open-ended evolution. *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 2004, 34: 323–346

l'environnement ;

b : ... par *capacités d'évolutions sans limites* il faut entendre le potentiel d'un système à reproduire les dynamiques fonctionnelles constitutives de base qui lui permettent de former des variétés illimitées de systèmes équivalents, disposant de voies différentes de réalisation de ces dynamiques, et qui ne sont soumis à aucune limite prédéterminée de complexité organisationnelle (Même si évidemment existe une limitation générale de nature matérielle et énergétique ainsi que celle imposée par les lois physico-chimiques universelles)».

Un exemple donc qui illustre la complexité du champ lexical employé pour définir la vie.

Définir la vie nécessite d'explicitier en détail les différents cadres théoriques qui contextualisent l'acception des termes employés. Ces contextes sont multiples, nourris par un implicite que les auteurs doivent également préciser.

Par exemple, le terme « système » ne renvoie pas uniquement à la théorie générale des systèmes de Von Bertalanfy, mais également à la théorie des structures dissipatives (Prigogine). L'utilisation de ce terme nécessite donc une mise en perspective de « ce » qui fait système. Ceci est réalisé par la référence faite à la biochimie (via les réactions *endergonique* et *exergonique*).

Sans aller plus loin dans l'analyse, c'est cette contextualisation que nous nous proposons d'analyser dans les parties qui vont suivre. On notera également que l'incise qui fait référence aux contraintes matérielles physico chimiques introduit une restriction qui circonscrit le potentiel d'évolution « sans limites » dans les bornes finies constituées par les lois de la nature. Cette opposition, au moins apparente, entre l'absence de limitation du système en tant qu'entité évolutive et les limitations qui l'inscrivent dans un environnement de contraintes, introduit un questionnement complémentaire intéressant : quel est l'ancrage de cette définition dans l'histoire de la pensée et des doctrines explicatives du phénomène vital ? En effet, ne retrouvons nous pas dans cette remarque comme un écho à un principe de vie comme puissance s'opposant aux forces physiques, au fondement d'une doctrine tombée en désuétude, le vitalisme ?

Finalement ce qui se joue dans l'approche du vivant, au détour des questions définitionnelles, c'est de pouvoir saisir dans le même geste théorique, à la fois la création

et la persistance de cette structure matérielle singulière. Car de ce point de vue, l'absence de définition univoque commune à toutes les disciplines scientifiques est assez révélatrice des problèmes posés par l'absence d'une théorie fondamentale de la vie ou du vivant.

Ce constat a été largement documenté et nous serons conduits à examiner plus attentivement ce qui se joue dans les multiples propositions définitionnelles rencontrées dans la littérature scientifique. Néanmoins cette multiplicité est également le signe d'une grande richesse d'approches qui conduisent, au-delà des variations lexicales, à restituer les facettes de ce qui constitue l'originalité du vivant. Pour reprendre une expression de Georges Canguilhem « l'intelligence ne peut s'appliquer à la vie qu'en reconnaissant l'originalité de la vie. La pensée du vivant doit tenir du vivant l'idée du vivant ».⁵ C'est en effet le vivant pris comme le donné de notre expérience que nous soumettons à nos interrogations multiples. Et ce sont ces interrogations qui seront mises en perspectives dans ce qui suit. En ce sens elles sont révélatrices de cette originalité du vivant.

C'est sous forme d'une enquête que nous essayerons de cerner ce qui permet de constituer cette originalité, cette singularité du vivant sur le plan scientifique, sans nous interdire cependant de noter les réminiscences de conceptions, d'approches qui font encore écho à un passé plus ou moins lointain de la pensée.

Cette enquête, nous la conduirons en trois temps.

Le premier temps s'attèlera à la matière constituée par les enjeux définitionnels et les diverses propositions de définition. Cette matière nous la traiterons comme une donnée empirique dont l'analyse philosophique doit permettre de dresser le bilan détaillé des enjeux et de la façon d'y répondre. Cette démarche vise à recenser, repérer, identifier les approches scientifiques, philosophiques, et mettre à jour impasses et avancées de ce qui finalement participe de notre compréhension du vivant.

Dans un second temps, nous prolongerons cet exposé par un retour sur un passé

⁵ Canguilhem Georges. *La connaissance de la vie. Introduction : La pensée et le vivant*. Paris: Librairie Philosophique J.Vrin, 1989, page 13

parfois lointain, mais également plus récent courant de la révolution galiléenne à l'entrée du 20^{em} siècle. Cette histoire de la pensée du vivant est révélatrice des rapports et impasses épistémologiques entre physique commune explicative de la nature non vivante et les approches tâtonnantes du monde vivant. Cette partie constituera donc un essai de mise en perspective de la caractérisation de la vie à travers des thématiques qui ont couru tout au long de l'histoire de la pensée philosophique et scientifique.

Enfin, dans un troisième temps, nous tenterons d'avancer et d'illustrer concrètement en quoi l'emploi de modèles globaux du vivant est à même de restituer, à la fois dans leurs partis pris de représentation et par la rigueur formelle qu'ils autorisent, l'essentiel de la singularité des êtres vivants. Ce parti pris implique d'accepter et d'ordonner la multiplicité de ces points de vue théoriques comme une nécessité permettant de comprendre la nature du vivant et par là, montrer que l'on retrouve dans ces modèles ses caractéristiques fondamentales.

Nous appuierons cette affirmation sur l'étude détaillée de trois modèles. Choisis pour leurs approches contrastées, ils constituent des exemples de styles de modélisation : du plus abstrait au plus proche de la matière. La démarche retenue est - à partir de trois exemples paradigmatiques - d'en présenter le détail technique afin d'en apprécier à chaque fois les partis pris et sous-jacents théoriques.

Trois styles, trois démarches paradigmatiques qui président à trois catégories de modèles. Dans chaque catégorie, le modèle présenté n'est pas nécessairement le plus récent, mais celui qui selon nous paraît être le plus représentatif de la diversité nécessaire pour saisir ce qui constitue l'originalité des systèmes vivants.

Ainsi nous nous étendrons sur les travaux menés dans les années 70 par Eigen et Schuster qui ont introduit le concept de système moléculaire darwinien. On y retrouvera d'ailleurs aisément le principe en œuvre dans des démarches plus récentes, telles que celles développées par le biochimiste Addy Pross⁶. Dans le même ordre d'idée, l'analyse détaillée du *chemoton* de Tibor Gánti introduira aux approches qui font du vivant un système

⁶ Pross Addy. *What is Life? How chemistry become biology*. Oxford University Press, 2012

cybernétique singulier, « fluide », pour reprendre l'expression de son auteur, caractérisé également par l'internalisation d'une contrainte forte de couplage de trois des fonctions majeures présentes dans tout vivant. Enfin avec la « clôture sur cause efficiente », c'est la topologie du vivant dans son aspect le plus essentiel qui est détaillée et analysée par Rosen. Cette analyse introduira aux approches qui caractérisent la singularité du vivant par la mise en lumière de rapports essentiels le différenciant des systèmes mécaniques.

Ces trois modèles nous livrent ce qui constitue les traits essentiels du vivant. Ils sont au service d'une stratégie qui capte la réalité vivante dans ses données les plus fondamentales, justifiant par-là d'ailleurs la nécessité du recours à des approches plurielles.

C'est ce qui au fond légitime notre démarche. En effet, nous pensons nécessaire la richesse des approches multiples mises en œuvre, qui loin de brouiller notre compréhension de la vie, l'enrichissent et la précisent. La contextualisation de ces approches à travers les définitions de la vie qui les résument, dans leurs rattachements en opposition ou parfois également en prolongement de questionnements ancrés dans un passé plus ou moins récent, dans les représentations globales formalisées, constitue les linéaments d'une pleine compréhension du phénomène vital dans un contexte matérialiste.

Les résultats de notre investigation s'ordonneront donc en trois parties, chacune introduisant trois temps de réflexions :

- Première partie : le vivant dans sa définition ;
- Deuxième partie : la vie à travers l'histoire constitutive de la compréhension du vivant ;
- Troisième partie : le vivant à travers ses représentations formelles.

PREMIERE PARTIE :

DEFINIR LA VIE, QUELS ENJEUX ?

1. Définir la vie, Quels enjeux?

La première partie de notre enquête, exploitera un matériau riche et diversifié : les multiples définitions de la vie proposées tant par les sciences de la vie que par d'autres disciplines scientifiques.

Le constat maintes fois répété d'absence de définitions univoques et universellement reconnues de la vie, procédant la plupart du temps d'approches intuitives communes au scientifique et au non spécialiste, peut certes être troublant. Ainsi que l'indiquait l'astrophysicien Carl Sagan en 1970 : Il n'y a pas de définition communément acceptée de la vie. En fait, il existe une certaine tendance clairement discernable pour chaque spécialité biologique, à définir la vie en des termes qui leur sont propres⁷. Et cette tendance conduit à une inflation de définitions et d'approches visant à caractériser des organisations matérielles support des propriétés vitales. C'est cette richesse définitionnelle que nous nous proposons d'analyser.

S'agissant de l'examen de ce qui se joue dans ces approches contemporaines de définition de la vie ou du vivant, nous nous proposons tout d'abord de préciser les enjeux propres aux sciences qui ont pour objet l'étude et la compréhension du phénomène vital. Nous tenterons ensuite de les mettre en perspective pour proposer une caractérisation des problématiques identifiées et repérer alors les obstacles épistémologiques au fondement de ce spectre définitionnel.

⁷ Malaterre Christophe, *Les origines de la vie : Emergence ou explication réductive. Chapitre 1 : La vie et ses origines.* (p.17). Paris : Hermann Editeurs, 2010

1.1 Quelle actualité, quels enjeux autour de la définition de la vie

1.1.1 Les développements des sciences de la vie autour de la biologie se sont réalisés sans faire d'une définition du vivant ou de la vie un enjeu central d'investigation

Prenons un ouvrage de biologie, le *Traité du vivant*⁸ par exemple, une somme faisant le point des connaissances sur le « vivant », on n'y trouve nulle définition de la vie. Plus récemment encore, un manuel de référence de biologie moléculaire : « *The Cell* »⁹, ne présentait pas non plus de définition de la vie, de la cellule vivante, mais introduisait l'ouvrage par les caractéristiques universelles de la cellule sur terre. En résumé, tout se passe comme si en tant qu'objet d'étude, le vivant au centre des préoccupations de la biologie et plus généralement des sciences de la vie, demeurait un donné, un fait d'expérience première qu'il ne s'agirait plus que de connaître par l'analyse et sa caractérisation, dans un mouvement de description de plus en plus fin et détaillé, sans que la communauté scientifique ait besoin de se mobiliser pour en définir les contours, voire de préciser la nature de ce qui est au centre du champ d'étude.

Pourtant, le terme biologie inventé au début du 19^e siècle par Trévinarius en Allemagne, Lamarck en France, constitue l'affirmation qui fait du vivant, de la vie ou « *bios* », l'objet central d'une investigation scientifique allant au-delà de l'histoire naturelle des vivants. La revendication de cette centralité et la constitution d'une discipline autour du vivant, ont alors conduit au développement et aux succès d'une science au cours des 19^e et 20^e siècles sans que l'objet même de son champ d'étude ait été défini. De fait, ce développement s'est réalisé sans définition scientifique préalable, et sans que cette absence constitue un obstacle à ses progrès, y compris les plus récents. Si le terme biologie renvoie bien vers la science des êtres vivants, la pratique constante des scientifiques qui participent directement par leurs activités à la compréhension des phénoménalités vivantes sur les plans théorique et pratique, s'exonère du soin de définir la vie.

⁸ Ruffié Jacques. *Traité du vivant*. Paris : Fayard, le temps des sciences, 1988

⁹ Bruce Alberts, Alexander Johnson, Julian Lewis, Martin Raff, Keith Roberts, Peter Walter. *Molecular Biology of the cell*. New York: Garland Science, 2002

Cependant il convient de faire justice au fait que nombreux ont été les savants, les scientifiques qui ont abordé cette question, non plus comme nécessité centrale et nécessaire au développement d'une théorie, d'une démarche, mais comme complément à leur activité scientifique. Ils l'ont réalisée après un parcours riche, comme point d'orgue à une carrière fructueuse, résumant en somme les acquis scientifiques, dans une réflexion sur la nature même de la vie afin de rendre compte ainsi de la communauté des êtres vivants. Et ce couronnement de carrière trouve alors son achèvement dans des apports proprement philosophiques autour de la définition de la vie.

Ce double mouvement, refus de recherche d'une définition *prima facie* au profit d'une démarche pragmatique, expérimentale, et en même temps synthèse des acquis d'un moment de la connaissance des phénomènes vivants autour d'une proposition de définition, en s'échappant alors de la stricte doxa scientifique centrée sur la caractérisation des êtres vivants, pour tenter de cerner ce qui constitue le propre du vivant est celle d'un Claude Bernard. Dans les « Leçons sur les phénomènes de la vie communs aux animaux et aux végétaux » (1878)¹⁰ c'est tout d'abord l'affirmation de la méthodologie scientifique positiviste : « Renonçant à définir l'indéfinissable, nous essayerons simplement de caractériser les corps vivants par rapport aux corps bruts ». Et par-là Claude Bernard opposait la démarche propre aux sciences de la nature à celle en vigueur dans « les sciences de l'esprit » :

La méthode qui consiste à définir et à tout déduire d'une définition peut convenir aux sciences de l'esprit, mais elle est contraire à l'esprit même des sciences expérimentales... Lorsque l'on parle de la vie, on se comprend à ce sujet sans difficulté, et c'est assez pour justifier l'emploi du terme d'une manière exempte d'équivoques. Il suffit que l'on s'entende sur le mot *vie*, pour l'employer ; mais il faut surtout que nous sachions qu'il est illusoire et chimérique, contraire à l'esprit même de la science, d'en chercher une définition absolue.Elle (la physiologie) est une science expérimentale et n'a pas à donner des définitions a priori.

Mais ce sera le même Claude Bernard commentant et critiquant les définitions *a priori* de la vie, élaborées par ses prédécesseurs, ses homologues, ou des philosophes, qui

¹⁰ Bernard Claude. *Leçons sur les phénomènes de la vie communs aux animaux et aux végétaux*. Paris : Librairie philosophique Vrin, 1966

proposera ses propres définitions de la vie : « La vie c'est la création », ¹¹ résumant ainsi dans un aphorisme lapidaire ce qui constitue le phénomène « particulier, spécial à l'être vivant » : la synthèse évolutive ou synthèse organisatrice.

Ce n'est donc pas que les scientifiques, les acteurs des sciences de la vie se désintéressaient de cette question, mais c'est qu'elle relevait d'une démarche plus philosophique, constituant en somme l'apport de la science à ce savoir informé que devait posséder tout honnête homme au fait de l'actualité scientifique.

Ce double mouvement, approche pragmatique dans le travail scientifique proprement dit, approche plus théorique quand il s'agit de caractériser sur un plan fondamental la vie, semble bien relever d'une attitude constante renforcée d'ailleurs au vingtième siècle par les succès même de la biologie moléculaire.

Ainsi François Jacob rappellera dans «La Logique du vivant »¹², que :

...reconnaître l'unité des processus physico-chimiques au niveau moléculaire, c'est dire que le vitalisme a perdu toute fonction. En fait depuis la naissance de la thermodynamique, la valeur opératoire du concept de vie n'a fait que se diluer et son pouvoir d'abstraction que décliner. On n'interroge plus la vie dans les laboratoires. On ne cherche plus à en cerner les contours. On s'efforce seulement d'analyser des systèmes vivants, leur structure, leur fonctionnement, leur histoire...

Et précisant cependant un peu plus loin «...mais on ne peut plus faire de la biologie sans se référer constamment au « projet » des organismes, au sens que leur donne leur existence même, à leurs structures et leurs fonctions... ». Amorçant par là un vrai questionnement philosophique qui cherchera une réponse dans le concept d'*intégron*, l'unité constituée par l'intégration de sous-unités, d'*intégrons* de niveau inférieur. Il s'agit là d'une caractérisation essentielle du vivant autour d'éléments organisationnels discrets formant une unité assurant l'intégration des éléments matériels du niveau inférieur, et canalisant leurs interactions.

Sur le plan de la vie du laboratoire au cœur même de l'activité scientifique, ce n'est

¹¹ Bernard Claude. *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale*. Paris : Garnier-Flammarion, 1966

¹² Jacob François. *La logique du vivant. Conclusion : L'intégron*. Paris : Tel.Gallimard,1970

donc pas le souci de définir la vie qui oriente l'activité quotidienne, mais c'est celui de l'identification dans les êtres vivants des processus mobilisés dans telle ou telle activité, des fonctions exercées par telle ou telle partie ; c'est celui de la caractérisation des mécanismes en jeu à travers l'expérimentation et la théorisation.

La conceptualisation de la vie est comme mise en retrait par rapport à l'activité de description de la fantastique diversité constituée par le vivant et par ses interrelations. Comme si la vie, donnée une fois pour toute à travers la multitude de ses manifestations, s'imposait à la sagacité de l'observateur (le scientifique, le biologiste) sans coup férir, comme une organisation nécessaire du monde et que ce qui importait alors c'était seulement d'y retrouver les raisons et les causes sous-tendant les phénomènes qui la manifestent et témoignent de sa diversité.

Dans cet ordre d'idée, la biologie relèverait d'une démarche pragmatique, nourrie par le fait que le biologiste connaîtrait d'emblée l'objet de son questionnement. Ce serait la biologie, science expérimentale s'interdisant toute spéculation s'agissant de l'être même de l'objet de son investigation. Finalement ce qui est au cœur de la démarche scientifique, ce n'est plus le vivant au sens commun, mais l'entité biologique, l'objet jugé pertinent au regard des interrogations menées par la communauté scientifique. Et dans ces conditions l'absence de définition commune, opératoire, ne serait alors que la conséquence de la nature instrumentale de la biologie (Rosenberg 1996)¹³. En somme, en raison de la complexité produite par la sélection naturelle, et en raison des limites de la cognition humaine, on ne pourrait accéder aux structures déterminantes des phénomènes biologiques qui devraient être captées dans une définition du vivant ou de la vie. Par conséquent, la biologie, dans toutes ses composantes (évolutionnaire, fonctionnelle, moléculaire...) serait condamnée à ne pouvoir fournir que des outils pratiques organisant la compréhension partielle de tel ou tel phénomène naturel, certes susceptibles des raffinements les plus subtils dans l'élaboration de mécanismes explicatifs, mais sans pouvoir livrer une compréhension théorique complète du monde vivant.

¹³Rosenberg Alexander. *Instrumental Biology or the disunity of Science. Chapter one: Biology as an instrumental Science.* The University Chicago Press :1994

1.1.2 Actualité contemporaine

Cependant, lié au développement de disciplines particulières, jouant aux frontières, aux marges du champ de la biologie, là où le vivant se confronte ou se confond avec l'inanimé, nous assistons à un renouveau d'essais de définitions dans le corps même de ces disciplines. Un constat s'impose donc que nous souhaiterions partager. Si la préoccupation de définir la vie n'avait jamais tout à fait quitté l'esprit des biologistes comme arrière-plan philosophique, ce à quoi on assiste, c'est à son retour en force, sa réintégration au cœur même d'une partie des démarches scientifiques, cette fois-ci comme une nécessité permettant et rendant plus aisée l'exploration de continents du savoir encore à défricher.

Et cet intérêt se nourrit de questions actuelles liées aux travaux sur les origines de la vie sur terre, à la recherche de traces de vie dans l'univers (l'exobiologie), aux développements de la biologie synthétique ainsi qu'aux travaux fédérés autour des thématiques de la vie artificielle. Enfin, les développements récents, livrant un éclairage nouveau du monde des virus, remettent elles aussi en question les frontières établies entre inanimé et animé.

De près ou indirectement, on aborde dans ces domaines nouveaux au regard des courants dominants de la biologie, des questions qui renvoient en dernière analyse aux origines même des êtres vivants, à ce qui sur un plan fondamental distingue l'animé de l'inanimé. Cette quête appelle et induit un effort de caractérisation, de recherche d'un propre qui ne serait plus celui qui s'offre à nous à travers la diversité du vivant actuel, mais qui se révélerait dans des structures plus intimes, des relations plus subtiles, ouvertes aux interrogations sur son universalité et s'offrant dès lors à être synthétisé au sein d'une définition .

On cherche donc à caractériser sur un plan fondamental, au-delà de ses manifestations phénoménologiques, ce qui constitue en propre l'être vivant dans sa singularité et ses différences d'avec l'autre monde, celui de la matière inanimée. Et par là on s'écarte alors de la matrice de connaissance constituée progressivement autour du « vivant tel que nous le connaissons », ce donné de notre nature terrestre. Et subsiste en arrière-plan, l'interrogation qui réduirait ce propre à n'être finalement que celui d'une histoire commune, néanmoins particulière, qui aurait inscrit certaines configurations matérielles dans une trajectoire évolutive conduisant à ce «vivant tel que nous le

connaissions ».

Penser le propre du vivant n'est donc pas à envisager seulement et nécessairement dans l'opposition radicale avec la matière non vivante, mais également dans son histoire, ce mouvement constant fait de ruptures et de continuités qui a permis à un « morceau de matière » de devenir un objet particulier possédant des propriétés qualitativement différentes de celles constituant son environnement, tout en étant formé, dans ses constituants les plus élémentaires, des mêmes matériaux de base que le restant du monde. Et dans cette perspective, définir, donc dire le propre du vivant, ce serait énoncer ce qui constitue fondamentalement la capacité d'un ensemble matériel à évoluer, à développer des organisations complexes¹⁴ pouvant acquérir des propriétés nouvelles, parfois en abandonner certaines, mais sans que cette capacité propre à évoluer disparaisse. Cet objet que l'on saurait alors définir posséderait une forme de permanence fondamentale associée à une capacité à évoluer, à s'adapter pour constituer finalement une gigantesque variation autour d'un même thème fondamental.

Cela a des conséquences sur la manière même de définir un objet aussi mobile et fluctuant. Il s'agira finalement moins de circonscrire pour délimiter un défini, que de saisir une propriété fondamentale à travers une dynamique, celle de l'évolution générale des systèmes vivants, celle des vivants eux même dans leurs variations individuelles.

Parler de degré de vie est alors tentant, dès lors que l'on essaye d'étalonner des structures réelles (par exemple des virus) ou hypothétiques (par exemple les premières formes qualifiables de vivantes sur terre) par rapport au vivant tel que nous le connaissons. Ce vivant actuel auquel on peut attribuer, à travers une forme de sommation virtuelle, l'ensemble des propriétés rencontrées dans la diversité des organismes vivants. Et alors, questionner les conditions qui rendraient ou auraient rendu possibles l'émergence de structures possédant partiellement ces propriétés vitales, sélectionnant celles qui de par leur rôle structurant assureront la pérennité d'un potentiel de vie et d'une capacité à évoluer, en constituera le complément nécessaire pour nourrir les interrogations

¹⁴ Complexité au sens du nombre d'interrelations croissantes au sein d'une même entité.

de ceux qui travaillent sur les origines de la vie ou encore sur la vie extra-terrestre.

Clairement les disciplines comme l'exobiologie, les travaux concernant les origines de la vie, la vie artificielle, la biologie synthétique, la biologie théorique dans ce qu'elle vise comme synthèse explicative, appellent à des approches qui nécessitent une clarification du concept de vie. Cela peut l'être pour des raisons différenciées : poser précisément et clairement les conditions d'apparition de vie sur terre pour la première, envisager le basculement du statut de simulacre au statut d'être vivant ou à l'inverse son maintien en tant que chimère, ou encore modéliser ce vivant afin de disposer du support théorique qui puisse en rendre compte. Dans l'ensemble, ces disciplines remettent au centre du questionnement scientifique les essais de caractérisation et de définition de la structure vivante.

Ces problématiques, nous souhaitons les illustrer par une revue rapide de ces différents domaines d'investigation en débutant par quelques remarques concernant les cas limites du vivant.

- ***Le vivant et ses cas limites***

Dans cet ordre d'idée, les virus constituent un objet d'interrogation particulièrement fascinant. Ils forment une sorte de passerelle entre vie et non vie, entre une matière non organisée formée de protéines, d'acides nucléiques isolés, et la matière rassemblée et organisée au sein d'une cellule dont la forme la plus élémentaire est constituée par les procaryotes.

L'organisation matérielle des virus se caractérise par une apparente simplicité : en général, mais pas toujours, une capsid de protéines entoure un filament d'acide nucléique formé soit d'ADN soit d'ARN. Et selon l'angle d'approche retenu, cette structure sera qualifiée de non vivante car incapable sous sa forme autonome, particulière de virion, de capter de l'énergie libre et de mettre en œuvre un métabolisme. Mais dès lors que ces virions intègrent une cellule vivante hôte ils deviennent aptes à en prendre le contrôle. De ce point de vue, le virus peut alors être vu comme vivant car disposant à ses propres fins du métabolisme de la cellule hôte.

L'unité de la branche virale s'est construite autour d'une absence, celle de ribosomes, et d'une communauté, celle formée d'agrégats d'ADN ou d'ARN et d'une

capside.^{15,16} Mais cette unité est également celle d'un processus viral qui unifie des entités aux caractéristiques individuelles différentes : virions, cellules hôtes, puis cellule transformée en « usine à virions » et nouveaux virions s'échappant après lyse cellulaire de la cellule hôte. C'est la dynamique créée par la « prise de contrôle » de la cellule par l'incorporation du virion qui crée une nouvelle entité virale dirigée vers la reproduction du virion.

Les problèmes abordés dans ce contexte conduisent à deux interrogations. L'une concerne l'opportunité et la possibilité d'attribuer des degrés de vie à un objet matériel,¹⁷ l'autre a trait à la façon d'intégrer une dimension populationnelle qui qualifierait de vivant non plus une entité matérielle déterminée, mais un processus mettant en jeu plusieurs formations matérielles dont seule la dynamique d'ensemble pourrait être qualifiable de vivante. La réponse engage donc la façon de prendre en compte des entités matérielles différentes dans leurs rapports de transformation pour pouvoir parler de « vie ». La vie résulterait alors de l'interaction entre différents types d'organisations matérielles élémentaires à l'exemple du virion et de sa cellule cible. Elle pourrait alors être identifiée à ce qui s'exprime dans cette dynamique complexe.

Aborder la question des virus et autres particules (La réflexion peut en effet être élargie à d'autres entités biologiques à la frontière du vivant telles les plasmides) comme objets modifiant notre appréhension des frontières de la vie, du moins celle que nous étudions dans les sciences de la vie, est donc intéressante à plusieurs titres. Parce que d'une part, cette part d'arbitraire qui conduit à englober ou exclure certaines entités biologiques de la sphère des vivants renvoie à un questionnement sur l'être même de la vie. Mais également et d'autre part, au-delà de cet intérêt philosophique, elle reste révélatrice des pratiques des acteurs même de ces sciences, de recherche de consensus concrétisés par

¹⁵ Lwoff André, The Concept of Virus. *Journal of General Microbiology*, 1957, vol. 17, n° 2. Dans cet article l'auteur a synthétisé l'ensemble des caractéristiques de ces objets biologiques.

¹⁶ Le Comité international de taxonomie des virus (traduction de l'acronyme anglais ICTV) publie régulièrement une classification des virus. Ainsi en 2011 on distinguait 6 ordres, 94 familles, 22 sous familles, 395 genres et 2480 espèces virales différentes.

¹⁷ Malaterre Christophe. On What It is to Fly Can Tell Us Something About What It is to Live. *Origin of Life and Evolution of the Biosphere*, 2010, 40:169

une décision de la communauté scientifique¹⁸ permettant d'inclure ou d'exclure tel ou tel objet d'une liste à critères. Plus globalement, elle engage une réflexion sur le sens et la nature de l'individu en biologie. En effet, en tant qu'entité biologique à la limite du vivant, le virus peut être vu comme un « non individu » quand il est hors de la cellule infectée (stade du virion), ou comme doté d'une individualité propre lorsqu'après pénétration de la cellule hôte, il en a pris le contrôle.

- ***Exobiologie***

La Société Française d'Exobiologie définit l'exobiologie comme l'étude de la vie dans l'univers, et précise qu'elle « inclut l'étude des conditions et des processus qui ont permis l'émergence du vivant sur notre planète et ont pu ou pourraient le permettre ailleurs, l'étude de l'évolution de la matière organique vers des structures complexes dans l'univers, et les recherches qui concernent la distribution de la vie sous toutes les formes qu'elle pourrait revêtir, et son évolution »

L'objet des recherches concerne donc l'étude de l'origine et de l'évolution de la distribution de la vie dans l'univers, ainsi que des conditions physique et chimique de systèmes matériels organisés telles les planètes qui, compte tenu de ce que nous connaissons de la vie, la rendrait possible.

Sur un plan pratique, il s'agit donc d'élaborer des critères ou des arguments qui permettent de signaler la présence d'une forme de vie, ou encore de repérer les conditions physico chimiques propices à son apparition.

La démarche d'ensemble repose sur une sorte de cohérence nomologique qui permettrait de passer de mesures physiques à la conclusion de la présence de signes attribuables à des manifestations vitales. Et sous ce rapport l'analogie semble reine. Ce

¹⁸ Un parallèle peut être établi avec la démarche de l'union astronomique internationale quant au statut de planète d'URANUS. Lors d'une décision prise lors de sa 26^{em}assemblée, ce corps céleste a été classé dans une catégorie différente de celle des planètes solaires suite au « durcissement » des critères d'appartenance à la catégorie planète (Uranus n'a en effet pas éliminé tout « corps susceptible de se déplacer au voisinage de son orbite » contrairement aux planètes proprement dites).

sont les comparaisons entre conditions qui président au développement des plantes, des lichens, des bactéries terrestres dans des situations limites, qui nourrissent ces rapports d'analogies médiatisées par leurs effets physico chimiques. On ne reproduit donc pas directement ce qui se passe sur terre, car notre rapport aux choses fait que ce que l'on identifie ce n'est pas la vie en soi, mais des signes qui induisent une présomption de vie. La démarche ici diffère de celle du biologiste qui dispose du vivant dans sa globalité, comme un « tout » dont il interroge les manifestations. En effet l'exobiologiste reste contraint par les moyens d'investigations disponibles qui restreignent ses approches aux savoirs construits et développés autour de la physico-chimie du vivant « terrestre », afin d'en repérer les traces indirectes dans l'univers.

La quête de formes vivantes extra-terrestres repose en fin de compte sur une caractérisation indirecte du vivant reposant sur l'enchaînement suivant: des conditions physico-chimiques semblables à celles régnant sur terre (eau, température, sources d'énergie etc...), et tenant compte de ce que nous savons de la formation abiotique des composés organiques incorporés dans le vivant tel que nous le connaissons, conduisent à une probabilité non nulle de formation d'organisations matérielles manifestant des propriétés semblables à celles des vivants terrestres. Partant notamment des définitions exploitant la chimie de la vie impliquée dans les mécanismes de régulation, de reproduction et d'adaptation dans un environnement propice, il s'agirait donc de trouver les conditions d'adéquation entre certaines des structures du monde non vivant : cristaux, planètes, galaxies, avec la possibilité d'expression de certains de ces mécanismes de régulation, de reproduction, d'adaptation, liés à l'existence de la vie telle que nous la connaissons sur terre.

Ce qu'on recherche donc, c'est d'une part des conditions « locales » propices à l'apparition de la vie et la conséquence qui en serait les traces ou les produits d'une éventuelle activité vitale. On postule donc par nécessité méthodologique, une forme d'universalité de la vie sur un schème causal qui pourrait être le suivant : dès lors que des conditions matérielles seraient remplies, la probabilité d'apparition de manifestations vitales (directes et indirectes) serait suffisamment élevée pour que des programmes d'investigations adéquats puissent être raisonnablement menés. On en revient donc à postuler des caractéristiques universelles qui conduiraient à l'apparition, ou l'émergence d'une forme de vie dont les mécanismes et la matière même seraient similaires ou comparables à ceux présents sur terre.

Mais reste néanmoins à préciser ce principe d'universalisation. S'agissant des objets qualifiables de vivant, s'agirait-il d'une certaine matière organique engageant un type déterminé de relations entre molécules, entre parties élémentaires ? Devrait-on alors postuler la même chimie (métabolisme, molécules mémoire suffisamment stable pour accumuler des informations, omniprésence d'enzymes catalysant les réactions etc.) que celle présente dans le vivant terrestre, pour être fondé à en interroger les manifestations indirectes dans l'univers ? Doit-on le rechercher dans les mêmes contraintes que celles décrites dans le vivant terrestre, par exemple l'organisation en cellules etc. ? Les interrogations sur ce qui constitue le propre du vivant paraît dans cet ordre d'idée au fondement même d'investigations fructueuses.

Par ailleurs, en quoi consisteraient ces conditions matérielles permettant l'émergence d'une forme de vie ? Même si le vivant terrestre manifeste une certaine plasticité dans sa capacité à évoluer, se développer dans des conditions physiques parfois surprenantes en gamme de pression, de température, de pH, de radiations etc. il n'en demeure pas moins que des limites fortes existent et qui, partant de ce que nous connaissons de la chimie du vivant terrestre, définissent un espace des possibles dans lequel des formes vivantes sont susceptibles de se développer.

- ***Origines de la vie***

Dans « *The origin of life* »¹⁹ Oparin exposait un modèle d'évolution de la terre autorisant une transformation progressive de la matière et conduisant à la formation de structures vivantes. Partant d'hypothèses sur les conditions physico-chimiques régnant sur la terre primitive, c'est la synthèse spontanée de substances organiques élémentaires à partir de matière minérale et la formation de gels évoluant vers la constitution de cellules vivantes primitives qui étaient proposées. Presque en parallèle des travaux du biochimiste soviétique, le biologiste anglais Haldane,²⁰ proposera également un scénario d'évolution vers la vie. Partant également d'hypothèses réalistes sur la physico chimie terrestre (par

¹⁹ Oparine A.I. *The Origin of Life on the earth. Translated from the Russian by Ann Singe.* Academic Press Inc., Publishers. New York: 1957. Disponible sur : <http://archive.org>.

²⁰ Haldane J.B.S. *The origin of life.* 1929. Disponible sur : www.valence/orilife

exemple une atmosphère primitive sans oxygène), cet auteur envisageait la formation d'une solution de molécules organiques par voie abiotique (en s'inspirant notamment des travaux du chimiste E.C.C Baly qui réalisât la synthèse d'acides aminés et de sucres en soumettant une solution aqueuse de CO₂ à irradiation par UV²¹), préfiguration de ce qui sera appelé « soupe primitive » pouvant évoluer par étapes successives vers la formation de cellules vivantes élémentaires. Par la suite les travaux d'Urey, l'expérience fondatrice de Miller en 1953 de « production d'acides aminés dans les conditions possibles de la terre primitive », ²² permirent de donner une consistance empirique aux réflexions menées quant aux origines naturelles du vivant.

L'origine hétérotrophe de la vie s'inscrit dès lors dans un schéma général de questionnement : établissement de conditions propices sur terre permettant la synthèse de molécules organiques élémentaires, assemblage de ces composés pour former des composés de nature polymériques, formation d'ensembles évoluant vers des protocellules etc., chaque étape faisant bien évidemment l'objet de conjectures, d'essais de reconstitution en laboratoire, d'approches théoriques à partir de modèles d'organisation ou de modèles de processus.

La question de l'origine de la vie sur terre engage par-là dans un champ de réflexions qui relève d'une biologie transitaire, une biologie des transitions entre matières, entre systèmes chimiques inanimés et systèmes vivants à travers une évolution chimique pré biotique. Dans cet ordre d'idée, on conçoit que les approches définitionnelles de la vie soient fondamentales. Elles portent en effet sur la nature même de la transition vie/non vie, sur les étapes jalonnant le chemin conduisant au vivant actuel, sur la nature fictive ou réelle de ce qui aurait pu constituer l'ancêtre commun à toutes les formes de vie présentes. On est bien évidemment porté à s'interroger sur la pertinence d'une définition de la vie qui tenterait de caractériser un seuil, sa nature, et qui conduirait à penser un avant non vivant d'un après proprement biologique. Cependant, à l'inverse, inscrire la formation de la vie dans une pure continuité paraît tout aussi problématique car évacuant toute

²¹ Baly E.C.C, Davies J.B., Johnson M.R., Shanassy H., The photosynthesis of naturally occurring compounds. 1. The action of ultraviolet light on carbonic acid. *Proc. Roy. Soc. London*:1927, A 116: 197–208

²² Miller Stanley L., A production of amino acids under primitive earth conditions. *Science*: 1953, 117,528-529

interrogation sur ce qui pourrait constituer la singularité d'une organisation matérielle spécifique. Il reste donc à concevoir une démarche globale qui puisse rendre compte de la formation d'une organisation matérielle originale apte à s'inscrire dans une histoire évolutive et conjuguant ruptures et continuités.

Dans cette perspective, la prise en compte d'un principe d'évolution constituera un point crucial. Qu'il s'agisse de celui théorisé dans le prolongement des travaux de Darwin ou d'un principe applicable au stade pré biotique, il faudra décider si ce principe doit être incorporé au sein même de ce qui constitue l'essence du vivant ou s'il peut être traité comme une contrainte somme toute externe au vivant. Et par ailleurs, les moteurs d'évolution biologique et pré biotiques peuvent-ils être conçus sur le même principe ?

- ***Vie artificielle***

L'expression « vie artificielle » créée par Langton désigne un large champ d'investigations visant à reproduire partiellement ou totalement des phénomènes vitaux en recourant à des supports matériels artificiels. Reprenons les propos de Langton qui introduit ainsi la finalité de cette démarche :

[elle]... est l'étude des systèmes construits de mains d'hommes qui exhibent des comportements caractéristiques des systèmes naturels vivants...., en tentant de synthétiser des comportements semblables au vivant au sein d'ordinateurs et d'autres substrats artificiels. En étendant les fondements empiriques sur lesquels la biologie est basée au-delà de la vie à base de carbone qui a évolué sur Terre, la vie artificielle peut contribuer à la biologie théorique en positionnant la vie telle que nous la connaissons au sein d'un espace plus large : la vie telle qu'elle pourrait être.²³

Dans une affirmation radicale, il introduisait également une version forte de vie artificielle :

Le but ultime de la vie artificielle serait de créer la « vie » dans un autre substrat, idéalement un substrat virtuel où l'essence de la vie aurait été abstraite des détails de sa mise en œuvre dans quelque substrat que ce soit. Nous aimerions construire des modèles qui sont si semblables au vivant qu'ils cesseraient d'être des

²³ Langton C.G. *Artificial Life I*. Addison-Wesley:1989, p.1

simulations de la vie pour en devenir des exemples.²⁴

En pratique la vie artificielle couvre donc un champ d'investigations large, pluridisciplinaire, associant sciences de la vie, informatique scientifique, robotique, en vue de simuler ou de synthétiser des processus vivants par des moyens artificiels. Ces activités renvoient indirectement aux caractéristiques phénoménologiques de la vie naturelle que l'on essaye totalement ou partiellement à reproduire.

Ce terme de vie artificielle peut sembler paradoxal car on associe deux mots qui dans le langage courant s'opposent. La vie est en effet ce qui s'oppose à l'artificiel, au fabriqué. L'oxymore est alors porteur d'un projet : signifier la volonté humaine de réintégrer la vie, le vivant dans le droit commun des objets maîtrisables par sa science. Par-là, elle est aussi porteuse d'une compréhension du vivant qui va au-delà du projet technique de *mimesis* du vivant naturel. Le vivant, au sens de système matériel organisé pour mimer la vie telle que nous la connaissons, devient un objet justiciable d'une approche qui arriverait à énoncer la réconciliation entre une démarche de décomposition d'un tout en composants élémentaires et la capacité à les remonter pour reformer l'ensemble, le tout organisé présentant des caractéristiques proches, similaires voire identiques sur le fond à l'objet initial. Le vivant artificiel serait alors équivalent au vivant naturel dont on a réalisé la décomposition analytique aux fins d'analyse, de connaissance, de compréhension. Il conduit à révéler par le succès de sa maîtrise opératoire, les secrets de la « machine » vivante.

Ces approches interpellent les essais de définition de la vie naturelle dans le sens où elles ont pour ambition de dépasser le strict cadre de la vie telle que nous la connaissons, pour viser une universalité applicable à des formes matérielles de vie différentes. Cette quête d'universalité tente de se décliner hors de tout support matériel, la vie relevant de principes généraux qui pourraient être implémentés dans des systèmes matériels différents de ceux connus ou supposés être ceux préexistant à l'origine de la vie sur terre. C'est *in fine* le lien entre vie et substrat matériel qui est reposé, la démarche sous

²⁴ Langton C.G. Studying Artificial Life with Cellular Automata. *Physica*, 1986, 22

tendue par la vie artificielle exploitant les propriétés de la matière vivante sous forme hyperbolique en introduisant une propriété (vitale) pouvant être portée par toute matière organisée, organique ou non. C'est le lien matière-vie qui est ainsi relâché, les programmes qui mettent la vie artificielle au cœur de leurs recherches conduisant à élaborer des critères communs permettant de généraliser le concept même de vie à tous systèmes, naturels ou artificiels.

Néanmoins, si dans la vie artificielle les artefacts produits instancient les propriétés universelles de vie, ce qui finalement par un changement de perspective se fait jour, c'est une définition de ce qui constitue typiquement la vie terrestre. Celle-ci demeure, et pour cause, la seule réalisation par une organisation matérielle concrète, naturelle, du phénomène vital, par rapport à laquelle on est bien conduit à étalonner les propriétés des objets artificiels créés afin d'en apprécier le degré de similitude, l'étendue de l'écart résiduel subsistant entre l'artefact et son modèle naturel.

Partant de là, peut-être faudrait-il concevoir des notions de vie différentes : celle terrestre qui serait en somme une forme de vie locale, spécifique que l'on ne saurait pas copier sur d'autres supports matériels car ayant « vécu » une histoire singulière avec une matière propre liée à la vie d'une planète solaire déterminée, et une vie générale précisément circonscrite à quelques phénomènes fondamentaux, réalisable par une large classe d'organisation matérielle. Ainsi un robot produit par les techniques de vie artificielle pourrait être vivant au vu du deuxième sens mais pas au vu du premier.

Dans le même mouvement, ce travail de comparaison, d'identification, conduit donc paradoxalement en retour à préciser les différences essentielles entre systèmes vivants et artefacts humains. Cette confrontation,²⁵ un biologiste et un spécialiste en robotique l'ont entreprise en se livrant au jeu des comparaisons et différences entre organismes vivants et robots. Ainsi si pour l'un, un robot est bien une machine physico chimique autonome préservant l'intégrité de sa structure, pour le biologiste, en référence à la définition de la vie retenue par la NASA (Octobre 1992), la vie « ...est un système

²⁵ Brack André; Trouble Michel, Defining life: connecting Robotics and chemistry. *Origin Of Life and Evolution of The Biosphere*, 2010, 40: 131 – 136

chimique autonome capable d'évolution darwinienne». Et dans ce jeu des similitudes et des différences, le biologiste met en exergue une différence fondamentale avec l'artefact: l'absence de capacité d'autoreproduction avec variation et donc l'impossibilité à s'engager dans une histoire évolutive.

Au final, l'opposition nature/laboratoire qui se répète dans une opposition nature/systèmes computationnels (les ordinateurs), se manifeste comme un biais permettant d'accéder à une meilleure compréhension de la vie, comme confrontation d'une intelligence artificielle, mécanisée avec un réel naturalisé.

- ***Biologie synthétique***

On reste dans une logique proche de la « vie artificielle » exposée précédemment dans la mesure où on peut y reconnaître un mot d'ordre commun : la synthèse succède à l'analyse. Pour reprendre les propos de Leduc inventeur de l'expression « biologie synthétique » au début du vingtième siècle :

Quand on est arrivé à connaître le mécanisme physique de la production d'un objet ou d'un phénomène, (...) il devient possible (...) de reproduire l'objet ou le phénomène, la science est devenue synthétique. La biologie est une science comme les autres, (...) elle doit être successivement descriptive, analytique et synthétique.²⁶

Le biologiste et chimiste Stephan Leduc ouvrit par là un programme d'investigation, avec une première réalisation connue sous l'expression de « jardins chimiques », qui nous rapproche plus des problématiques de vie artificielle exposés ci-dessus. Reste bien évidemment l'ambivalence du terme qui recouvre à la fois la synthèse complète d'artefacts susceptible d'exprimer un comportement biologique (darwinien par exemple) sans référence à la matière même qui constitue le vivant naturel, et à l'inverse la fabrication de vivants plus ou moins profondément modifiés à partir d'une base biologique existante (Ou naturelle).²⁷

²⁶ Tirard Stéphane. *Stéphane Leduc (1853-1939) De la médecine à la biologie synthétique*. Histoire des Sciences Médicales : 2009, Tome XLIII - N° 1

²⁷ Benner Steven A., Sismour Michael A., Synthetic Biology. *Nature Reviews Genetics*, 2005, Volume 6 : 543

La biologie synthétique contemporaine se développera sur un fond théorique et pratique constitué à travers le génie génétique des années 1980-1990 (ADN recombinant, nucléases de synthèse, PCR etc.). Le contenu contemporain que vise l'expression « biologie synthétique » ne concerne dès lors que l'exploitation des potentialités du vivant actuel organisé autour de la matière organique qui le constitue. Elle vise à exploiter les potentialités de ce vivant naturel en le modifiant au niveau moléculaire pour lui conférer des propriétés intéressantes. Révélateur à ce titre, le premier congrès de ce domaine d'activité : « *Synthetic Biology 1.0* » organisé au MIT en 2004, marquera l'acte de naissance « officielle » de la biologie synthétique contemporaine.²⁸ Les objectifs poursuivis diffèrent quelque peu de ceux de la « vie artificielle » tout en partageant un fond commun qui relève d'une sorte d'orientation générale : synthétiser l'objet de la recherche pour mieux le comprendre.

Partant de ce qui semble acquis, ou admis du socle de connaissance du vivant tel que nous le connaissons, on cherche dans cette perspective à caractériser la cellule minimale et ses constituants, à créer de nouvelles fonctions par des assemblages de « bio briques », à synthétiser des protéines inédites, à déterminer le réseau minimal de gènes rendant possible la réalisation des fonctions de base d'un organisme vivant élémentaire. La démarche globale contribue à une plus grande compréhension du passage de l'inerte au vivant à partir de processus physico chimiques simples.²⁹

C'est par exemple, l'identification des mécanismes de constitution d'une fonction réalisée dans un organisme à partir des ensembles de processus chimiques élémentaires. Dans cette perspective, la fonction est vue comme un processus élémentaire ou composé qui sert et est utile à l'ensemble, à l'organisme.

²⁸ L'annonce de ce premier séminaire est intéressante : Why a Synthetic Biology Conference? Synthetic Biology 1.0 will bring together, for the first time, researchers who are working to (i) design and build biological parts, devices and integrated biological systems, (ii) develop technologies that enable such work, and (iii) place this scientific and engineering research within its current and future social context. Site de: The First International Meeting on Synthetic Biology. *Synthetic Biology 1.0*. June 10 – 12, 2004 Cambridge, MA.

²⁹ Molina Parez Alberto. Techniques et concepts du vivant en biologie synthétique. *Ludus vitalis*, 2009, vol. XVII: num. 31

Dans cette ingénierie vivante, l'accent est mis sur le rôle et la place de systèmes matériels : des gènes fonctionnant en réseau et formant des sortes de modules. L'identification de dispositifs intégrés que l'on pourrait manipuler pour en modifier l'effet produit dans l'organisme participe d'une approche fonctionnelle de l'organisme. Il s'agit donc, d'une part de créer des micro-organismes de synthèse, des sortes de châssis vivants porteurs de modules, des bio-briques réalisant les fonctions désirées et d'autre part, de développer une ingénierie qui rendrait l'emploi du génie génétique d'utilisation plus aisé.

Le fond épistémologique des démarches de biologie synthétiques revient à comprendre par l'action, par la capacité à faire et à créer l'objet même de l'étude. Cela n'est pas sans rappeler la position du chimiste, créant des molécules n'existant pas dans la nature. On se rappellera le mot d'ordre de Marcellin Berthelot « la chimie crée son propre objet » et qui semble convenir parfaitement au geste du biologiste synthétique. On pourrait alors passer d'une décomposition analytique du vivant à sa fabrication sur le mode suivant : nous connaissons l'intégralité de la structure moléculaire de la cellule, nous disposons des techniques permettant de réaliser cette structure, nous pourrions alors fabriquer un organisme vivant qui n'est autre qu'une machine complexe.

Sur le fond, cela conduit à postuler que la vie n'est pas le fruit d'un accident, d'une réalisation contingente advenue sans nécessité, mais qu'elle résulte de l'application de principes, de mécanismes que l'on doit pouvoir reproduire grâce à des techniques appropriées. *Nolens volens* cette démarche en cas de réussite attestée, permettrait d'accéder à l'essence du vivant au même titre que la décomposition et la synthèse de l'eau conduit à identifier son essence à la formule « H₂O », c'est-à-dire à une combinaison d'atomes différents partageant une partie de leurs orbitales électroniques etc.

La capacité à faire renvoie à celle de comprendre, à saisir l'essence des choses par l'efficacité du geste créateur. La biologie synthétique fonderait alors la possibilité d'une théorie du vivant « en soi », non dépendante strictement de son occurrence terrestre, mais comme réalisation de principes généraux que l'on saurait exploiter au profit de finalités qui ne seraient plus dictées par la seule nature.

- **Biologie théorique**

Les définitions scientifiques de la vie s'inscrivent dans la recherche de critères permettant de différencier vie et non vie et renvoient d'une certaine manière à la fondation de la biologie constituée autour d'une pragmatique opposant le vivant à l'inanimé, à la non vie pour structurer son champ d'investigation. Cette fondation a pour conséquence une approche, qui tout en reconnaissant aux vivants une communauté fondamentale avec la matière universelle et aux autres structures matérielles, affirmant par ailleurs une identité méthodologique avec les autres sciences expérimentales, conduit néanmoins à mettre l'accent sur des critères, des données, des approches, des phénomènes propres et différenciant par rapport à ceux que l'on rencontre dans la matière inanimée. Elle trouve un écho dans ce que l'on appelle (peut être improprement) les définitions « listes » de la vie, ou définitions critères formées en listant les propriétés dont la conjonction identifie le vivant par ce qu'il est apte à réaliser : reproduction, métabolisme etc.

Mais tous ces critères sont établis *post facto*, à partir d'observations inscrites dans un délai temporel fini.³⁰ Le rapport vivant/non vivant reste du coup purement empirique et ne permet pas de fonder la notion d'une discontinuité quantitative et qualitative dans les lois de la nature.³¹

Et de ce point de vue, l'ambition de la biologie théorique ne viserait-elle pas (en partie) à dépasser ce point de vue purement empirique, et à dégager une vision globale du vivant à travers les approches de morphogenèse, ou de biologie des systèmes ? On ne réduira pas la biologie théorique à ces deux seuls courants, l'un tentant de rendre compte sur le plan théorique du développement de l'organisation vivante, l'autre développant une vision systémique, intégrative des différentes composantes élémentaires du vivant pour rendre compte sur un plan théorique du fonctionnement global du système. Ainsi, la biologie moléculaire en tant qu'elle mobilise des théories explicatives avec la mise en œuvre de schèmes explicatifs mécanique, historique, physique est bien évidemment

³⁰ Elsasser Walter. Synopsis of organismic theory. *Journal of Theoretical Biology*, 1964, 7

³¹ Wolfe Charles. La catégorie d'«organisme» dans la philosophie de la biologie. *Multitude*, 2004, 16

irriguée par une approche théorique sans laquelle les principales découvertes n'auraient pu être obtenues.³²

Dans la suite de notre enquête³³, nous serons conduits à revenir de manière plus approfondie sur ces aspects avec la présentation de différents modèles qui visent directement ou indirectement à répondre à la question : qu'est ce qui fait qu'un système matériel peut être qualifié de vivant ?

³²Morange Michel. *Les secrets du vivant : contre la pensée unique en biologie*. Paris : Sciences et Sociétés, Editions La Découverte, 2005

³³ Ce sera l'objet de la partie 3: les modèles du vivant.

1.2 Définitions de la vie : essais de mise en perspective.

Ce court aperçu de domaines de recherche qui questionnent directement la nature du vivant conduit à évoquer la manière dont la littérature scientifique tente de cerner le propre du vivant à travers ses propositions de définitions de la vie, tâche qui à l'examen permet d'en mesurer la difficulté. Car la matière est abondante et se présente comme le fruit d'une grande diversité d'approches témoignant d'ailleurs d'une grande inventivité dans la façon de caractériser le vivant. Nous tenterons d'en exposer les multiples facettes avant d'en extraire les aspects qui nous semblent les plus caractéristiques.

1.2.1 Que reflète la pluralité des essais répétés de définition de la vie ?

Les essais de caractérisation de la vie (ou du vivant) à travers sa définition témoignent de la difficulté à définir le concept central des sciences de la vie. La multiplicité de définitions qui mobilisent à la fois les sciences de la vie ainsi qu'un ensemble de disciplines connexes, si elle témoigne bien de l'absence de définition univoque énonçant les conditions nécessaires et suffisantes pour qu'un objet matériel soit vivant, est néanmoins également le signe d'une grande richesse d'approches. Comme si ce travail constituait une sorte de creuset multidisciplinaire dans lequel se fonderaient des propositions diverses pour produire au final l'image d'un vivant aux facettes multiples, résistant aux approches simplificatrices. La quête d'une définition univoque est propice aux convergences d'approches différenciées, mobilisant la physique, la chimie, la thermodynamique, la théorie des systèmes, et bien évidemment la biologie autour d'une interrogation : qu'est ce qui fait qu'un système matériel est qualifié de vivant ou encore qu'y a-t-il de commun entre « *escherichia coli* », « *loxodonta africana* », l'hybride d'« *equus asinus* » et d'« *equus caballus* » et qui ne se retrouve dans aucun autre système matériel ? Le foisonnement de propositions qui vont être présentées dans le chapitre suivant en livrera un aperçu.

Nous y analyserons en effet un ensemble de définitions de la vie (ou du vivant)

rencontrées dans la littérature scientifique. Elles illustreront deux aspects intimement liés, les difficultés méthodologiques et l'absence d'ancrage dans une base théorique fondamentale.³⁴ Elles restent alors fortement liées au contexte scientifique dans lequel elles s'expriment.

Dans son ouvrage « *Between Necessity and Probability, Searching for the definition and origin of Life* »(2004), Radu Popa³⁵ recensait près de cent définitions de la vie. Gyuli Palyi dans « *Fundamentals of Life* »³⁶(2002) en identifiait également une cinquantaine, sans que l'on puisse dire d'ailleurs que ces deux recensions présentent la liste exhaustive de toutes les tentatives de définition de la vie. La diversité, le foisonnement des approches, illustrent la difficulté réelle de produire une définition univoque acceptée par la communauté scientifique et partagée par tous ceux qui au sein des sciences de la vie étudient, analysent, modélisent le vivant. Mais elle peut également être appréciée comme le signe de la vitalité d'un champ scientifique en pleine interrogation, en plein développement, testant, proposant en continu des amorces d'analyses, des synthèses partielles comme autant d'essais de théorisation visant à rendre compte du phénomène vivant, de son articulation avec les éléments matériels qui le constituent, de la singularité de cette forme d'organisation de la matière sur le plan individuel et collectif, de son potentiel d'universalité.

Rendre compte d'un ordre dans cette multitude, établir une classification de ces définitions semble être une gageure. Nous souhaitons donc d'abord rendre compte de la richesse de l'exercice définitionnel pour tenter ensuite un classement à partir des influences de différents styles de théorisation scientifique opérant au sein même du champ scientifique constitué autour des sciences de la vie. C'est donc utiliser la multitude de définitions comme une matière, pour y repérer quelques grandes orientations en relation avec des contextes de théorisation, celui de la biologie proprement dite mais également, comme nous l'avions effleuré précédemment ceux provenant de disciplines voisines,

³⁴Tsokolov Serhiy A. Why is the definition of life so elusive? *Astrobiology*, 2009, vol. 9

³⁵Popa Radu. *Between Necessity and Probability, Searching for the definition and origin of Life*. Berlin-Heidelberg : Springer, 2004

³⁶ Pali Gyula, Zucchi Claudia, Caglioti Luciano, *Fundamentals of Life*. Elsevier, 2002

connexes dans lesquelles les scientifiques ont puisées pour tenter de cerner ce qui fait le propre du vivant.

Les listes dressées par Radu Popa et Gyuli Pályi complétées par des définitions plus récentes ou plus classiques, constitueront la matière de base permettant de repérer ces grandes orientations et de mettre en scène les réflexions contemporaines sous tendues par ces définitions.³⁷

- ***La vie au carrefour de différences essentielles constitutives.***

Cette famille d'approches se décline en deux temps : d'abord sous forme de constats lapidaires: la vie est quelque chose à part, pour introduire ensuite quelques concepts qui visent à saisir ses différences essentielles.

La polyphonie résultante de l'exercice répété et toujours renouvelé de définitions de la vie recourant à des critères, des listes de propriétés, s'accompagne d'un sentiment de vacuité, d'inutilité de ces tentatives, voire d'une vision pessimiste quant à la capacité même à définir la vie.

Lazcano (1994)³⁸ ne remarquait-il pas avec une pointe d'humour, que la vie est comme la musique, « on peut la décrire mais pas la définir », signant par là même l'inanité de définitions listes, qui sont au mieux des manières de résumer des observations dont on sélectionnerait les plus significatives.

On introduit ainsi tout un courant qui fait fond sur l'irréductibilité du vivant : « la vie restera toujours quelque chose à part, même si nous découvrons qu'elle est mécaniquement stimulée et propagée jusqu'aux plus fins détails. » (Virchow 1855³⁹).

Ou encore, « la vie est une puissance, une force, ou une propriété d'un type spécial et particulier, influençant temporairement la matière et ses forces ordinaires, mais

³⁷ L'ensemble des définitions présentées dans ce chapitre a été traduit par nos soins. L'indication de l'auteur et de l'année de production renvoie aux ouvrages des deux auteurs cités.

³⁸ Lazcano A, *Early Life on Earth*. Bengton S. éditeur, Columbia University Press, pp.60-69, 1994

³⁹ Virchow R., *Cellular Pathology*. In Disease, Life and Man : Selected Asays Stanford University Press, 1855

entièrement différente et non corrélée avec ces dernières. » (Beale 1871⁴⁰)

Une formulation contemporaine par Rizzoti (2002)⁴¹ construit une définition de la vie comme une résistance : « la vie est instanciée par des objets qui résistent à la décomposition au moyen d'assimilations constructives » rejoignant la formule lapidaire : « la Vie est création » (Claude Bernard, 1878).⁴²

De même : « c'est vivant si cela peut mourir » (Lauterbur 2002⁴³) comme un écho à l'affirmation d'Engels (1880⁴⁴) : « la physiologie doit intégrer la mort comme facteur essentiel de la vie. »

L'oxymore sert donc à introduire la spécificité du vivant, à signer une irréductibilité.

Mais la vie c'est également l'affirmation d'une subjectivité de la matière. Ainsi cette définition de Soriano⁴⁵ (2002) : « la vie c'est la capacité de l'organisme à formuler des questions » et dans le même ordre d'idée pour Guerrero⁴⁶(2002), « la vie c'est la matière qui fait des choix, lie le temps et crée des ruptures de gradient ». Ce qui rejoint cette affirmation plus contemporaine et provocatrice : « la vie c'est un système qui possède une subjectivité » (Kawamura, 2002).⁴⁷

Les définitions mettent ici l'accent sur une différence irréductible de la vie, des vivants aux principes et lois qui régissent la matière inanimée et la recherche de propriétés que l'on pourrait qualifier d'exorbitantes du droit commun de la matière.

⁴⁰ Beale L.S., *Disease Germs, their Nature and Origin*. London 1872, p.9

⁴¹ Rizzoti M., Short definition of life, in : *Fundamentals of Life*. Déjà cité

⁴² Nous examinerons ultérieurement (partie II) les familles thématiques qui ont inspiré ces définitions. On retrouve clairement Bichat dans *Les Recherches physiologiques sur la vie et la Mort* : « la vie est l'ensemble des fonctions qui résistent à la mort ».

⁴³ Lauterbur P.C., *Short definitions of life*, in : *Fundamentals of Life*. Déjà cité

⁴⁴ Engels F., *Dialectic of Nature*. Editd by Dutt C.D. 1940

⁴⁵ Soriano D., *Short definition of life*, in : *Fundamentals of Life*. Déjà cite.

⁴⁶ Guerrero R., *Meetings Frontiers of Science*. In *Fundamentals of Life*. Déjà cité.

⁴⁷ Kawaruma K. *Short definitions of life*. In *Fundamentals of life*. Déjà cité. Filiation intellectuelle par rapport à la pensée de Hans Jonas, voir Jonas Hans, *Le phénomène de la vie, vers une biologie philosophique*. De Boeck Université : 2001

Les thèmes d'organisation, de complexité, d'information constituent alors l'accès privilégié à des définitions de la vie centrées sur ces caractères essentiels.

L'organisation est omniprésente dans la nature vivante : « On rencontre ordre et organisation dans la nature, dans chaque niche occupée par une communauté vivante, ainsi qu'au sein des organismes vivants eux même » (Beck et al. 1991⁴⁸).

« Les organismes vivants sont caractérisés par de l'ordre fonctionnel et morphologique » (Babloyanz 1986⁴⁹). Le vivant opère alors comme un grand opérateur d'ordre selon Capra⁵⁰(1997) : « par le monde vivant le chaos est transformé en ordre », qui parlera également d'un monde vivant se déployant vers un accroissement de la complexité.

Ainsi encore Hotchkiss (1956)⁵¹ qui tente de maîtriser ordre et désordre dans une même formule : « la vie est la production répétitive d'hétérogénéité ordonnée ». Enfin, à travers une définition qui est presque un programme d'investigation rassemblé en une seule phrase, Kompanichenko (2002)⁵² affirme que « la vie est une forme hautement organisée d'intenses résistances aux processus spontanés de destruction, développée via des interactions opportunes avec l'environnement et grâce à une auto régénération régulière ».

Une autre des orientations prises pour caractériser la spécificité, le propre du vivant conduit à faire fond sur la notion de complexité, comme corollaire du tropisme organisationnel.

Ainsi pour Orgel (1973)⁵³, les organismes vivants se distinguent par leur

⁴⁸ Beck W.S., Liem K.F., Simpson G.G., *Life: An Introduction to Biology*, 3rd ed., New York, Harper Collins Publishers, 1991

⁴⁹ Babloyanz A., *Molecules, Dynamics and Life*, John Wiley & Sons, Hoboken NJ, 1986

⁵⁰ Capra F., *The Web of Life: A New Synthesis of Mind and Matter*, Flamingo, London 1997

⁵¹ Hotchkiss R.D., *The assimilation of amino acids by respiring washed Staphylococci*. Arch.Bioch. 65(1), 302-318, 1956

⁵² Kompanichenko V.N., *Short definitions of Life*, in: Fundamentals of Life. Déjà cité.

⁵³ Orgel L.E., *The Origins of Life : Molecules and Natural Selection*. John Wiley, New York, p.189, 1973

complexité spécifique. De même Pályi et al. (2002)⁵⁴ notent que même le plus simple organisme présente un niveau de complexité non usuel.

La source de complexité est d'abord identifiée à celle des processus chimiques. Ainsi, sur un mode mineur, Markó (2002)⁵⁵ affirme que, du point de vue thermodynamique, la vie est un mécanisme qui recourt à des processus chimiques complexes permettant de faire décroître (localement) l'entropie.

De même Gusev (2002)⁵⁶ définit la vie comme un processus cyclique dépendant sur le plan énergétique de la chimie, et résultant d'un accroissement de la complexité fonctionnelle et structurelle des systèmes vivants et de leur environnement.

Anbar (2002)⁵⁷ en affirmant que « la vie est un processus qui organise la matière vers des niveaux plus élevés de complexité », systématise cette orientation en la positionnant sur un registre essentiel. Il en conclut qu'un système vivant doit être caractérisé par quatre fonctions distinctes: l'accroissement de la complexité, l'orientation de cette tendance d'accroissement de la complexité, sa préservation et enfin la fonction permettant de recruter et d'extraire l'énergie libre pour piloter les fonctions précédentes.

Complexité et information sont étroitement corrélées. Ainsi, pour DeLoof (1993)⁵⁸, « la vie est la capacité à communiquer » et pour Kolb (2002)⁵⁹ « la vie est la qualité nouvelle d'un système chimique, acquise par un changement dialectique résultant de la quantité de complexité du système. Cette qualité nouvelle est caractérisée par une capacité d'auto maintenance et d'auto préservation dans la durée ».

Mais cela n'a pas empêché l'étude concrète des systèmes vivants car « la vie est ce que la communauté et les institutions scientifiques acceptent comme vivant » (Friedman

⁵⁴ Pályi G., Zucchi C., Caglioti L., *Fundamentals of Life*, déjà cite.

⁵⁵ Markó L., *Some characteristics of Life and their implications on possible start on Earth*. In: *Fundamentals of Life*. Déjà cité.

⁵⁶ Gusev V.A., *Short definitions of life*. In : *Fundamentals of Life*. Déjà cité.

⁵⁷ Anbar M., *Short definitions of life*. In : *Fundamentals of Life*. Déjà cité.

⁵⁸ DeLoof A., Schrödinger 50 years ago : "What is Life?" "The ability to communicate", a plausible reply? *Int.J.Biochem.* 25,1715-1721, 1993

⁵⁹ Kolb V.M., *Short definitions of life*. In : *Fundamentals of Life*. Déjà cité.

2002⁶⁰). Le vivant est alors une donnée d'entrée de l'investigation scientifique.

- ***Le phénomène vivant caractérisé par ses propriétés : un air de famille constitué autour de collections et combinaisons de propriétés***

Nous venons d'examiner différentes façons de produire des définitions de la vie, qui chacune pose problème. Il est cependant d'usage de caractériser la vie par l'énoncé d'une liste de propriétés ou de caractéristiques propres au phénomène. On retrouve ainsi ces « définitions listes » rassemblant dans un énoncé unique une succession, ordonnée ou non, hiérarchisée ou non, établie parfois au ras même de la phénoménalité multiforme du vivant, mais qui visent également des phénoménalités moins apparentes, plus profondes mettant en jeu les processus physico chimiques.

De nombreux auteurs caractérisent donc la vie par la présence collective de plusieurs propriétés. Ainsi, Schultze-Makuch et Irwin (2004⁶¹) : « Il n'y a pas de propriété caractéristique qui soit à la fois intrinsèque et unique de la vie. Nous devons plutôt affirmer que la vie correspond à certains standards ou que la vie est qualifiée par la présence collective d'un certain nombre de caractéristiques ».

La singularité de la vie est donc à rechercher dans la présence simultanée de propriétés, ainsi que le note Schuster (1984)⁶² : « La singularité de la vie ne peut apparemment pas être réduite à une caractéristique unique qui serait absente dans le monde non vivant. C'est en effet la présence simultanée de toutes ces propriétés et caractéristiques qui constituent l'essence de la vie. »

Par ailleurs, ces approches ont également en vue l'élaboration de définitions opératoires, de définitions fondées sur des critères mesurables. Ainsi, Nealson⁶³ (2002) assigne une exigence quant à la définition du vivant. Elle doit être utile et conduire à des

⁶⁰ Friedman I., *Short definitions of life*. In : Fundamentals of Life. Déjà cité.

⁶¹ Shulze-Makuch D. and Irwin L.N., *Life in the Universe: Expectations and Constraints* Springer Berlin Heidelberg, 2004

⁶² Schuster P., *Evolution between chemistry and biology*. *Origin of Life*, 14, 3-14, 1984

⁶³ Nealson K., *Short definitions of life*. In : Fundamentals of Life. Déjà cité.

propriétés mesurables et par là incorporables dans une stratégie utilisable dans la recherche de la vie. Pour l'auteur, les termes de la définition seront alors dans cette perspective : les structures, la chimie, la réplication fidèle, l'évolution.

Oparin (1966)⁶⁴ à travers les travaux relatifs aux origines de la vie proposait une description reposant sur la présence de six propriétés : capacité d'échange de matière avec l'environnement, capacité de croissance, capacité à se multiplier, capacité à s'auto reproduire, capacité à se mouvoir, excitabilité et en complément, présence d'une membrane et interdépendance avec le milieu.

Dans le même ordre d'idées, Mayr (1982)⁶⁵ proposera une liste de huit propriétés et caractéristiques de la spécificité de la vie, tout en amorçant une articulation possible avec des principes explicatifs physico-chimiques ainsi qu'avec la théorie de l'évolution. La vie se caractérise donc par une organisation complexe et adaptative grâce à des mécanismes de rétroactions, par la composition chimique et la présence de macromolécules spécifiques (enzymes), par la prépondérance des phénomènes qualitatifs sur les phénomènes quantitatifs, par la capacité à maintenir une identité durant l'existence tout en possédant des caractères variables dans le temps ; elle se caractérise également par l'existence de classes d'organismes vivants définies par leurs connexions historiques, par le rôle de la sélection naturelle (dans la production des organismes) et de l'indéterminisme des processus vivants.

Vilee et al. (1989)⁶⁶ prennent également appui sur une série de caractéristiques permettant de distinguer les choses vivantes des non vivantes. Les premières disposent ainsi d'une forme précise d'organisation, d'une variété de réactions chimiques appelée métabolisme, d'une capacité à maintenir un environnement interne même en cas de modification de l'environnement externe (processus d'homéostasie), de motilité, de réactivité, de capacité à croître, à se reproduire et à s'adapter aux changements de l'environnement.

⁶⁴ Oparin A.I., *Life. Its Nature, Origine and Development*. Academic Press, New York and London, 1966

⁶⁵ Mayr Ernst, *The Growth of Biological Thought. Diversity, Evolution and Inheritance*. The Belknap Press of Harvard University Press Cambridge, Massachusetts London, England, 1982

⁶⁶ Vilee C.A. et al., *Biology*. 2nd editon, Sounders College Publishing, 1989

Ces listes de propriétés, procédant des analyses du vivant, de sa décomposition rationnelle est donc complétée par l'affirmation de leur nécessaire union. Ainsi Von Neuman (1948)⁶⁷ affirme que la vie résulte de l'union de deux propriétés dissociables seulement par l'analyse logique : le métabolisme et la réplication.

Ces listes de propriétés composant le phénomène vital sont également à géométrie variable.

Certains auteurs mettent cependant l'accent sur celles essentielles, indispensables à la manifestation d'une vie élémentaire, renvoyant celles, accessoires, comme conséquence des principales.

Ainsi la vie c'est d'abord acquisition d'énergie, croissance, adaptation, reproduction pour Webster (1979). Ou encore la vie c'est l'individualité, la reproduction, l'évolution (Korzeniewski 2001⁶⁸). Keszthelyi (2002)⁶⁹ affirme dans une formulation lapidaire: « la vie est métabolisme et prolifération ».

Les listes sont alors réduites aux fondements du vivant, énonçant les conditions nécessaires et suffisantes de vie, dont les autres caractéristiques accessoires en découleraient.

Ces approches « liste » demeurent présentes même aux niveaux d'analyses identifiant ce qui sous-tend l'expression des propriétés vitales phénoménologiques.

Par exemple, Alexandre (1948)⁷⁰ distingue deux types de critères de vie : la capacité à diriger les changements chimiques via la catalyse, la capacité à la reproduction par auto catalyse, et dans cette perspective, les changements de catalyse héréditaires sont considérés comme étant fondamentaux.

⁶⁷ Von Neuman J., *The general and logical theory of automata. Cerebral Mechanisme in behavior.* The Hixon Symposium, ed. By L.A. Jeffress, John Wiley, New York, pp.1-41, 1951

⁶⁸ Korzeniewski B. *Cybernetic formulation of the definition of life.* Journal of Theoretical Biology, 209,275-286, 2001

⁶⁹ Keszthelyi L., *Short definitions of life.* In : Fundamentals of Life. Déjà cité.

⁷⁰ Alexander J., *Life: Its Nature and Origin.* Reinhold Publishing Company, New York, 1948

Dyson (1997)⁷¹ définit la vie comme réplication et métabolisme et dans le prolongement des conjectures de Schrödinger⁷² (1944), explique la réplication par la stabilité des structures moléculaires (mécanique quantique), et le métabolisme par la capacité de la cellule vivante à extraire de l'entropie négative de l'environnement (deuxième loi de la thermodynamique)

Horowitz (1959)⁷³ identifie trois propriétés de la matière vivante : auto-duplication et autoréplication (2002), hétéro catalyse, mutabilité et son corollaire, la nécessité de disposer de propriétés génétiques.

Lacey et al. (2002)⁷⁴ voient dans l'être vivant un système dégradable, semi isolé, pouvant survivre grâce à sa capacité à générer une mémoire moléculaire lui permettant de développer sa capacité à répondre à l'environnement. L'auteur identifie trois caractéristiques des êtres vivants : ceux-ci doivent être isolés de l'environnement externe (fondant ainsi son individualité) tout en pouvant en être dégradés, et être de taille réduite afin que les vitesses de transfert de matière soient rapides. Par ailleurs, l'être vivant doit être capable de générer une représentation moléculaire de son environnement externe et interne (rôle de la mémoire moléculaire), être capable de « sentir » cet environnement afin de pouvoir lui répondre en synthétisant des molécules actives utilisant les matériaux disponibles.

Buick (2002)⁷⁵ définit la vie comme un système chimique hors équilibre, contenant des polymères organiques, se reproduisant de façon autonome, disposant d'une activité métabolique propre et séparé de son environnement.

A un niveau d'abstraction plus élevé, on fera appel à des propriétés plus fondamentales qui mettent la matière comme entre parenthèses. Par exemple : « en

⁷¹ Dyson F., *Origins of Life*. Cambridge University Press, 1997

⁷² Schrödinger Erwin. *Qu'est-ce que la vie ? De la physique à la biologie*. Traduction française, Christian Bourgeois Editeur : 1986

⁷³ Horowitz N.H., On defining Life. In : *The origin of life on earth*, Ed. Clark, Synge R.L., pp.106-107, Pergamon, London 1959

⁷⁴ Lacey J.C.Jr. and al., *Short definitions of life*. In : *Fundamentals of Life*. Déjà cité.

⁷⁵ Buick R., *Short definitions of life*. In : *Fundamentals of Life*. Déjà cité.

résumer, la vie c'est l'auto organisation, l'auto réplication, l'évolution via les mutations, le métabolisme, et l'« encapsulation » permettant de concentrer les réactifs ». (Arrhenius 2002)⁷⁶

Dans une perspective populationnelle, Von Kiedrowski (2002)⁷⁷ définit la vie comme la manifestation d'une population localisée de systèmes chimiques non linéaires, contrôlés par l'information et capables de s'auto reproduire, de s'adapter, de coévoluer vers des niveaux de complexité fonctionnelle globale plus élevée.

Pour Abel (2002)⁷⁸, la vie est la synthèse de processus algorithmiques dynamiques fortement intégrés d'où procèdent métabolisme homéostatique, développement, croissance et reproduction.

Dans une approche mixant thermodynamique, mécanique et biologie, Eirich (2002)⁷⁹ définit comme vivant tout moteur cellulaire homo ou hétéro trophique ainsi que leur union, possédant les instructions nécessaires à son fonctionnement, sa reproduction, sa localisation, son individuation et son cycle de vie.

La vie est également caractérisable par une combinaison d'états et de processus dans une définition qui associe à la fois déséquilibre thermodynamique, état de basse entropie, encodage et traitement d'information. (Shulze-Makuch et Irwin 2004⁸⁰).

Chez Sertorio et Tenetti (2001)⁸¹ qui souhaitent développer une définition faible de la vie, un système vivant occupe un domaine fini, est structuré, agit selon des buts non connus et se reproduit.

⁸²Fong (1973) affirmera que la vie est composée de trois éléments de base : la

⁷⁶ Arrhenius G., *Short definitions of life*. In : Fundamentals of Life. Déjà cité.

⁷⁷ Von Kiedrowski, *Short definitions of life*. In : Fundamentals of Life. Déjà cité.

⁷⁸ Abel D.L., *is Life reducible to complexity?* In : Fundamentals of Life. Déjà cité.

⁷⁹ Eirich F.R., *Short definitions of life*. In : Fundamentals of Life. Déjà cité.

⁸⁰ Shulze-Makuch D., Irwin L.N., *Life in the Universe: Expectations and Constraints*, Springer, Berlin Heidelberg, 2004

⁸¹ Sertorio L., Tinetti G., *Available energy for life on a planet, with or without stellar radiation*. DFTT, Italy, July 1-30, 2001

⁸² Fong P., *Thermodynamic statistical theory of life: an outline*. In : *Biogenesis, Evolution, Homeostasis. A*

matière, l'énergie et l'information.

- ***La vie, attribut d'un agrégat particulier de la matière***

Si la vie, le vivant doit être compris comme une chose spécifique, difficile et complexe à caractériser et saisir, il n'en demeure pas moins que les approches dominantes font des objets vivants des regroupements originaux de matière, reportant la spécificité de la vie sur le mode d'agrégation de la matière.

En 1872, Bastian⁸³ affirmait que : « les choses vivantes sont des agrégats particuliers de matière et de forces ordinaires qui dans leur état séparé ne possèdent pas les qualités reconnues comme vivantes. »

Putter (1923)⁸⁴ considère que ce que nous appelons vie c'est la « manière particulière de composer de la matière et des processus ainsi que leur organisation spatiale et temporelle. »

Inspiré de la théorie des liaisons chimiques, Bernal (1967)⁸⁵ définit la vie comme « l'auto réalisation, partielle, continue et interactive, sous conditions, des potentialités des états électroniques des atomes. »

Dans le cadre des travaux sur la « vision cellulaire », au plus près de la physique fondamentale, Jibu et al. (1997)⁸⁶ suggèrent une définition de la vie fondée sur l'« existence d'une région d'eau ordonnée dynamiquement et réalisant un condensat de boson de photons évanescents à l'intérieur et à l'extérieur de la cellule ». C'est la généralisation d'une propriété de « vision » cellulaire (hypothèse avancée par le biologiste Albrecht-Buehler) à l'ensemble du vivant.

symposium by Correspondance. Pp. 93-101, Springer-Verlag, Berlin 1973

⁸³ Bastian H., C., cited in *The Nature and Origin of Living Matter*. p.147, Fisher Unwin, London, 1872

⁸⁴ Putter A. cité dans: Van Bertalanffy L., *Modern Theories of Development : an Introduction to Theoretical Biology*. P.51, The Science Library, Harper and Brothers, New York 1933

⁸⁵ Bernal J.D., *The Origins of Life*. Weinfeld and Nicholson, London, 1967

⁸⁶ Jibu M., Yasue K., Hagan S., Evanescent (tunneling) photon and cellular "vision". *BioSystems* 42, 65-73, 1967

La vie est pour Folsome (1979)⁸⁷ la « propriété de la matière résultante du couplage cyclique de bio éléments en solution aqueuse, déterminé en dernier ressort par l'énergie radiante et permettant d'atteindre le maximum de complexité ».

Cette matière est spécifiée par la prééminence accordée au rôle des composés organiques. Ainsi Klabunovsky (2002)⁸⁸ propose la définition suivante : « la vie est la conséquence inévitable de l'existence de composés organiques optiquement actifs », et chez Kauffman (1993)⁸⁹ la vie est une propriété résultante de l'auto-organisation collective de polymères à propriétés catalytiques.

Pour Victor Kunin (2000)⁹⁰, la vie est un système formé d'acide nucléique et de protéines polymérasés, alimenté en continu en monomères, en énergie et en protection.

Et pour clore cette revue, Turian (1999)⁹¹ concluait-provisoirement- que les biologistes n'avaient plus besoin de recourir à une force magique qui anime la matière inerte pour expliquer la vie, mais considéraient qu'il s'agissait d'une propriété émergente basée sur le comportement des matériaux qui constituent les objets vivants. Ce que précise plus récemment Addy Pross (2012) qui explique que « la vie est juste le réseau résultant de réactions chimiques qui ont émergé à partir d'un cycle continu de réplifications, mutations, complexifications et sélections opérant sur un certain type de chaînes moléculaires (pour ce qui concerne la vie sur terre : les acides nucléiques) ». ⁹²

Dans une reformulation par Korzeniewski (2001)⁹³ de définitions avancées par Prigogine(1980)⁹⁴, Prigogine et Stengers (1984)⁹⁵, les unités vivantes sont comme « des

⁸⁷ Folsome C.E., *The Origin of Life*. Freeman, San Francisco, 1979

⁸⁸ Klabunovsky E., *Short definitions of life*. In : Fundamentals of Life. Déjà cité.

⁸⁹ Kaufman S.A., Autocatalytic sets of proteins. *Journal of Theoretical Biology*, 119, 1-24, 1986

⁹⁰ Kunin V. A system of two polymerases-A model for the origin of life. *Origin of Life and evolution of the Biosphere*, 30, 459-466, 2000

⁹¹ Turian G., Origin of Life II. From prebiotic replicators to protocells. *Archives des Sciences*, 52,2,pp.101-109, 1999

⁹² Pross Addy, *What is Life? How Chemistry Becomes Biology*. Oxford University Press, 2012

⁹³ Korzeniewski B., Cybernetic formulation of the definition of life. *Journal of Theoretical Biology*, 209, 275-286, 2001

⁹⁴ Prigogine I., *From Being to Becoming*. Freeman W.,H., San Francisco, 1980

⁹⁵ Prigogine I., Stengers I., *Order out of Chaos*. Heinemann, London, 1984

objets formés de composés organiques, comme des structures dissipatives, ou au moins comme des systèmes dynamiques de faible entropie loin de l'équilibre thermodynamique ».

Chez Dyson (1999)⁹⁶ cette organisation de la matière est finalisée. La vie y est définie comme « un système matériel qui peut acquérir, stocker, traiter et utiliser de l'information afin d'organiser son activité. »

De plus pour Katz (1986)⁹⁷ la vie résulte d'un degré de déterminisme élevé : « La vie relève de structures de déterminations complexes qui requièrent une détermination forte pour être formées. Ces structures de détermination sont constituées de matrices biologiques, spécifiques, possédant des propriétés de stabilité, de cohérence, de permanence et qui sont autoreproductibles. La stabilité de cette propriété de reproductibilité a constitué un grand changement. La vie est en effet de la matière qui a appris à recréer fidèlement ce qui par ailleurs n'était constitué que de formes établies au hasard ».

Kulaev (2002)⁹⁸ retrouve cependant des accents essentialistes en définissant la vie comme « une forme d'existence d'une substance capable d'autoreproduction et d'entretenir avec l'environnement la permanence du métabolisme. »

Pour Colin-Garcia et Guzman-Marmolejo (2002)⁹⁹ la vie est une « qualité (une propriété) associée fondamentalement à la continuité et au changement des caractéristiques de certaines molécules. »

Lahav et Nir (2002)¹⁰⁰, identifient l'entité vivante à un ensemble de molécules présentant une organisation spatiale disposant de boucles de rétroaction formées de molécules informationnelles utilisant de l'énergie et des matériaux provenant de

⁹⁶ Dyson F., *Life in the Universe: Is Life Digital or Analogue?* NASA Goddard Space Flight Center Colloquium, Greenbelt MD., 1999

⁹⁷ Katz M.J., *Templates and Explanation of Complex Patterns*. Cambridge University Press, 1986

⁹⁸ Kulaev I.S., *Short definitions of life*. In : *Fundamentals of Life*. Déjà cité.

⁹⁹ Colin-Garcia M., Guzman-Marmolejo A., *Short definitions of life*. In : *Fundamentals of Life*. Déjà cité.

¹⁰⁰ Lahav N., Nir S., *Life's definition : in search of the most fundamental common denominators between all living entities through the entire history of life*. In : *Fundamentals of Life*. Déjà cité.

l'environnement afin d'assurer, croissance, reproduction et évolution.

Pour Scorei (2002)¹⁰¹ la vie est une forme d'organisation matérielle indépendante sur les plans énergétiques et informationnels (auto supportée), possédant une bonne capacité d'auto instruction et de création.

La définition proposée par Brack (2002)¹⁰² exemplifie les approches biochimistes des origines de la vie : « La vie est un système chimique capable de transférer ses informations moléculaires indépendamment (autoreproduction) en réalisant quelques erreurs accidentelles permettant au système d'évoluer ».

Chez Boiteau (2002)¹⁰³, la vie est un ensemble de moteurs moléculaires fonctionnant en symbiose, opérant continûment hors équilibre, alimentés par un flux ouvert d'énergie et de matière tout en recyclant une grande partie de ses composants à travers une chimie cyclique.

Le point de vue du chimiste conduit Markó (2002)¹⁰⁴ à définir la vie comme un processus auto catalytique complexe dans lequel les produits finaux des réactions se déroulant au sein de la cellule vivante (acides nucléiques, polypeptides et protéines, oligo et polysaccharides) catalysent leur propre formation. Et du point de vue thermodynamique, la vie est un mécanisme qui recourt à des processus complexes permettant de diminuer l'entropie.

La chimie, et son accompagnement thermodynamique sont également mis au service de l'explication des propriétés biologiques fondamentales dans la définition de la vie proposée par Baltcheffsky (2002)¹⁰⁵. L'auteur définit la vie comme un « système moléculaire indépendant, transformant énergie et matière afin de développer ses capacités de réplifications avec mutations et d'évolutions anastrophique ».

¹⁰¹ Scorei R.I., *Short definitions of life*. In : Fundamentals of Life. Déjà cité.

¹⁰² Brack André, *Short definitions of life*. In : Fundamentals of Life. Déjà cité.

¹⁰³ Boiteau L., *Short definitions of life*. In : Fundamentals of Life. Déjà cité.

¹⁰⁴ Markó L., *Some characteristics of life and their implications on possible start on Earth*. In : Fundamentals of Life. Déjà cité.

¹⁰⁵ Baltcheffsky H., Schultz A., Baltcheffsky M., *Fundamental characteristics of life and the molecular origin and evolution of biological energy conversion*. In : Fundamentals of Life. Déjà cité.

Pour Nair (2002)¹⁰⁶ la vie est un attribut des systèmes vivants : « C'est une assimilation, transformation et réarrangement continu de molécules selon un programme contenu dans le système vivant afin de le perpétuer. »

Et la différence radicale avec la matière inerte peut s'énoncer sur un mode simple : ce qui différencie organisme vivant et matière inanimée c'est l'existence d'un génome et d'un code génétique (Yockey 2002¹⁰⁷).

- ***De l'agrégat de matière au « tout » de l'organisme : la spécificité du vivant comme système d'intégration.***

Les agrégats de matière ont été caractérisés par leurs propriétés, par les effets résultant d'une certaine disposition. Une approche définitionnelle complémentaire mettra l'accent sur un type d'organisation matérielle, spécifiée comme système afin de rendre compte de la manifestation vivante.

Si caractériser la vie comme étant « le processus de fonctionnement d'organismes vivants » (Erokhin 2002¹⁰⁸), ou comme étant l'« attribut de systèmes vivants » (Nair 2002) ne permet pas strictement de définir la vie, elle ordonne néanmoins un rapport particulier entre des systèmes (organismes) et la propriété vitale

Et pour faire le lien avec le paragraphe précédent, voici une deuxième définition proposée par Lahav (2002¹⁰⁹) : « Une entité vivante terrestre est un ensemble de systèmes à boucles de rétroactions reposant sur des molécules porteuses d'informations. Ils sont constitués d'une pluralité de molécules organiques de différentes natures, couplées spatialement et fonctionnant grâce à des réseaux de réactions catalysées dirigées sur matrice, utilisant interactivement, énergie et molécules organiques provenant de l'environnement. Une entité vivante est une succession ininterrompue d'ensembles de systèmes à boucle de rétroaction ayant évolué entre le moment de leur émergence et celui

¹⁰⁶ Nair C.K.K., *Short definitions of life*. In : Fundamentals of Life. Déjà cité.

¹⁰⁷ Yockey H.P., *Short definitions of life*. In : Fundamentals of Life. Déjà cité.

¹⁰⁸ Erokhin A.S., *Short definitions of life*. In : Fundamentals of Life. Déjà cité.

¹⁰⁹ Lahav N., *Short definitions of life*. In : Fundamentals of Life. Déjà cité.

de leur observation. »

En référence à la théorie générale des systèmes, Von Bertalanffy (1933)¹¹⁰ énonce le principe d'articulation, ou d'identification d'un organisme vivant avec le système. « Un organisme vivant est un système organisé selon un ordre hiérarchique, formé d'un grand nombre de parties différentes, dans lesquelles les nombreux processus sont disposés de telle façon que leurs relations mutuelles au sein de larges plages de fonctionnement mettant en œuvre des échanges continus de matériaux et d'énergie le constituant, et malgré les distorsions provoquées par les influences externes, permettent de générer le système, de le maintenir dans un état qui lui est propre ou de le conduire via ces processus à produire des systèmes similaires. »

Sur un mode plus concis, van Bertalanffy définira par la suite (1968)¹¹¹ la vie comme une hiérarchie organisationnelle de systèmes ouverts.

La théorie des systèmes introduira tout un vocabulaire de boucles de rétroaction, de couplage, de régulation etc.

Lwoff (1962)¹¹² recourra à ces vocables pour définir la vie comme un « système traitant l'information », et mettra ainsi au cœur de la vie la génétique moléculaire comme support du système traitant l'information génétique.

Sans entrer dans les détails évoquant des mécanismes possibles de réalisation du système, Perrett (1952)¹¹³ définira la vie comme un « système ouvert se perpétuant potentiellement par lui-même, constitué par des réactions organiques, catalysées étapes par étapes et quasi iso thermiquement par des catalyseurs complexes et spécifiques, produits par le système ».

Gatlin (1972) complète cette définition en énonçant que la vie est une hiérarchie structurée d'unités en fonctionnement qui ont acquis à travers l'évolution la capacité de

¹¹⁰ Von Bertalanffy Ludwig, *Modern Theories of Development* : An introduction to Theoretical Biology. Déjà cité.

¹¹¹ Von Bertalanffy Ludwig, *Théorie générale des systèmes*. Bordas, Paris 1973

¹¹² Lwoff André., *Biological Order*, MIT Press, Cambridge, MA.1962

¹¹³ Perret J., Biochemistry and bacteria. *New Biology* 12,68-69, 1952

stocker et traiter l'information nécessaire à leur reproduction. Et Gánti (1975)¹¹⁴ fournit les critères minimaux auxquels satisferont les systèmes vivants: le métabolisme, l'autoreproduction, la prolifération spatiale. Ces critères seront complétés par les capacités à muter et à évoluer propres aux formes plus complexes.

Et ce sont ces systèmes qui permettent à Arrhenius (2002)¹¹⁵ de définir la vie comme un système ayant les propriétés suivantes : auto-organisation, auto répliation, évolutivité, métabolisme et encapsulation concentrative.

Korzeniewski (2001)¹¹⁶ explicite les différences entre systèmes inanimés et vivants dans le cadre d'une théorie de la régulation des systèmes. La vie semble posséder trois propriétés (fortement reliées les unes aux autres et constituant en fait trois facettes de la même chose) qui sont absentes dans les systèmes inanimés. La vie est ainsi l'expression d'individus définis qui se reproduisent (ce qui implique la capacité de transférer leur identité à une progéniture) et qui évoluent (leur identité peut changer de génération en génération). L'individu vivant est alors caractérisé comme étant un réseau inférieur de feed-back négatifs (mécanismes de régulations) subordonné à (au service de) un feed-back positif supérieur (le potentiel d'expansion de la vie).

De même Erokhin (2002)¹¹⁷ définit l'organisme vivant comme un système catalytique ouvert, multi niveaux, résultant du développement d'activités catalytiques, de processus de base optimisés par l'évolution, et possédant la propriété d'auto reproduction. La vie est donc le processus de fonctionnement des organismes vivants.

Dans le même ordre d'idées, Sattler (1986)¹¹⁸ définissait un système vivant comme un système ouvert, auto-réplicatif, auto régulé recevant son énergie de l'environnement.

¹¹⁴ Gánti T., Organization of chemical reactions into dividing and metabolising units: the chemotons. *BioSystems* 7, 189-195, 1975

¹¹⁵ Arrhenius G., *Short definitions of life*. In : Fundamentals of Life. Déjà cité.

¹¹⁶ Korzeniewski B., Cybernetic formulation of the definition of life. *Journal of Theoretical Biology*, 209, 275-286, 2001

¹¹⁷ Erokhin A.S., *Short definitions of life*. In : Fundamentals of Life. Déjà cité.

¹¹⁸ Sattler R., *Bio-philosophy*. Springer-Verlag, Berlin, 1986

Schulze-Makuch et al. (2002)¹¹⁹ caractérisent les systèmes vivants comme des systèmes qui sont : 1) composés de microenvironnements bornés, en équilibre thermodynamique avec leur environnement ; 2) capables de transformer de l'énergie afin de maintenir un état de basse entropie ; 3) et capables de produire des copies structurellement distinctes à partir d'instructions codées indéfiniment perpétuées à travers le temps, malgré la disparition du porteur individuel par lequel ils sont transmis. Ce que Bergareche et Ruiz-Mirazo (1999) résumant par : la vie est une organisation récursive (autoproduction et autoreproduction) dans laquelle les niveaux dynamiques et informationnels sont mutuellement dépendants (interdépendants).

Korzeniewski encore,¹²⁰ dans une démarche plus abstraite, présente la vie (un individu vivant) comme résultant de systèmes d'interactions à deux niveaux, soit celui d'« un réseau inférieur de rétroactions négatives, subordonné ou asservi à une rétroaction positive supérieure » (conférant le potentiel d'expansion au système vivant). L'auteur a formalisé cette approche autour du concept d'« évoluon », individu cybernétique porteur de la définition.¹²¹

On est ainsi au cœur d'une approche cybernétique de la vie. La définition a pour ambition de livrer les conditions nécessaires et suffisantes de la vie en identifiant ce qui doit nécessairement être pour qu'une entité, un objet puisse être qualifié de vivant. Elle vise à capter l'essence de la vie dans le cadre d'une définition minimale élaborée autour de propriétés attribuables en propre aux seuls êtres vivants. Par-là elle échappe aux défauts liés aux définitions se contentant de lister des propriétés rencontrées parmi les vivants terrestres.

Les définitions élaborées à partir du concept d'autopoïèse de Maturana et Valera (1980)¹²² constituent une forme d'achèvement des approches systèmes. Par exemple Luisi

¹¹⁹ Schulze-Makuch D. and al. Redefining life : *An ecological, thermodynamic and bioinformatics approach*. In : *Fundamentals of Life*. Déjà cité.

¹²⁰ Korzeniewski B., *Cybernetic formulation of the definition of life*. *Journal of Theoretical Biology* 2001,209 275-286

¹²¹ L'auteur fait référence aux travaux d'Eigen et Schuster de 1979 que nous présenterons dans la troisième partie. L'hypercycle est cité comme exemple d'émergence d'un individu cybernétique.

¹²² Maturana H.R., Valera F.J., *Autopoiesis and Cognition. The Realization of the Living*. Reidel D.,Dortrecht 1980

(1993)¹²³ définira la vie comme « un réseau métabolique au sein d'une frontière. Tout ce qui est vivant doit être basé sur l'autopoïèse. Si un système est auto poïétique, il sera vivant, c'est-à-dire qu'il correspondra à la définition de la vie minimale ». L'organisme vivant est donc caractérisé selon Csanyi et Kampis (1985)¹²⁴ par la réplication présentée comme un processus de copie réalisé par un réseau spécifique de composants inter reliés, et d'autres composants participant aux processus fabriquant le réseau même qui les a produits.

Luisi (1998)¹²⁵ définira alors le système vivant minimal comme devant être : homéostatique et autonome (*self-sustaining*), capable d'utiliser de l'énergie libre, inscrit dans un compartiment semi-perméable, et capable de produire par lui-même les composants de production.

Finalement ce que l'on essaie ainsi de caractériser et de spécifier c'est l'organisme vivant comme système matériel.

Par exemple, Haukioja (1982)¹²⁶ définit l'organisme comme système ouvert disposant des capacités d'un automate apte à se maintenir sur le long terme grâce à la présence d'une organisation pouvant élaborer des automates nouveaux.

De même Root-Bernstein et Dillon (1997)¹²⁷ définissent l'organisme vivant comme un système caractérisé par une forte intégration réalisée grâce à des processus d'organisation mettant en jeu des complémentarités moléculaires.

La vie est donc la propriété d'un système matériel qui peut acquérir, stocker, mettre en œuvre et utiliser l'information afin d'organiser ses activités (Dyson 2000¹²⁸).

¹²³ Luisi P.L., *Defining the transition to life: self-replicating bounded structures and chemical autopoiesis*. Thinking about Biology, ed. By Stein W., Varela F.J., Addison-Wesley, New Jersey, 1993

¹²⁴ Csanyi V., Kampis G., Autogenesis : The evolution of replicative systems. *Journal of Theoretical Biology*, 14,303-321, 1985

¹²⁵ Luisi P.L., About various definitions of life. *Origin of Life and Evolution of the Biosphere*. 28,613-622,1998

¹²⁶ Haukioja E., Are individuals really subordinate to genes ? A theory of living entities. *Journal of Theoretical Biology*, 99, 357-375, 1982

¹²⁷ Root-Bernstein R.S., Dillon P.F., Molecular complementarity I: The complementarity theory of the origin and evolution of life. *Journal of Theoretical Biology*, 18, 447-479, 1997

¹²⁸ Dyson F., Colloquium at NASA's Goddard Space Flight Center, 2000

Reste cependant à préciser les mécanismes (matériels) qui donnent vie à de tels systèmes.

Noda (2002)¹²⁹ propose : « la vie est un système qui peut se reproduire à l'aide de mécanismes génétiques », rejoignant l'affirmation d'Oparin (1961) qui sonne comme un axiome : « tout système capable de réplication et mutation est vivant. »

Et certaines définitions court-circuitent pour ainsi dire les concepts biologiques, chimiques pour s'ancrer directement dans la physique. Par exemple Lifson (1997)¹³⁰ caractérisera la matière animée en référence à celle du physicien : « De la même manière que la dualité onde particule signifie systèmes microscopiques, l'irréversibilité et la tendance vers l'équilibre caractérisent les systèmes thermodynamiques, les groupes de symétries spatiales sont typiques des cristaux, la téléonomie et l'organisation signifient la matière animée. » Les choses animées et seulement la matière animée peut être dite organisée, signifiant ainsi qu'un système est fait d'éléments, chacun d'entre eux possédant une fonction contribuant nécessairement au fonctionnement du système pris comme un tout.

Sur un plan plus abstrait, Krumbein (2002)¹³¹ caractérise comme vivant tout système qui crée, maintient et modifie des dissymétries. Et Robert Rosen (1991)¹³² spécifiera l'organisme comme « système matériel clos sur la cause efficiente » pour affirmer que « la vie est la manifestation d'un certain type de modèle relationnel ».

Néanmoins, c'est avec la chimie organique que le système est taillé dans l'étoffe constituant le vivant actuel. Ainsi Alstein (2002)¹³³ définit la vie comme le mode d'existence de systèmes ouverts hors équilibre (thermodynamique), composés de polymères carbonés, capables de s'auto reproduire et d'évoluer via la synthèse dirigée sur gabarit (*Template synthesis*) de ses composés polymériques.

¹²⁹ Noda H., *Short definitions of life*. In : Fundamentals of Life. Déjà cité.

¹³⁰ Lifson S., On the crucial stages in the origin of animated matter. *Journal of Molecular Evolution*, 4, 1-8, 1997

¹³¹ Krumbein W.E., *Short definitions of life*. In : Fundamentals of Life. Déjà cité.

¹³² Rosen Robert, *Life Itself. A comprehensive inquiry into the nature, origin, and fabrication of life*. New York: Columbia University Press, 1991

¹³³ Alstein A.D., *Short definitions of life*. In : Fundamentals of Life. Déjà cité.

Le concept de système s'applique à la fois aux entités élémentaires et à leurs interactions mutuelles. C'est ce que reprend Guimarães (2002)¹³⁴ en proposant une définition à deux niveaux : « les êtres vivants sont des systèmes fonctionnellement complexes. La vie est un concept abstrait décrivant les propriétés de cellules, d'objets concrets. Elle est le processus constitué par des systèmes métaboliques évolutifs individualisés. Les fonctions spécifiquement vivantes sont : le métabolisme, la croissance, la reproduction stabilisée à travers les générations. »

¹³⁴ Guimarães R.C., *Short definitions of life*. In : Fundamentals of Life. Déjà cité.

- ***Les dynamiques de la vie***

Systèmes matériels dotés d'organisations spécifiques, exprimant des modes de fonctionnement originaux, les objets vivants disposent également de temporalités propres, celles de leur fonctionnement, de leur développement, de leur évolution. Les définitions de la vie, mettent alors l'accent sur cet aspect pour proposer une approche de la vie centrée sur le potentiel évolutif d'un système matériel, sur l'échange continu entre le vivant, le système, l'organisme etc. et son environnement. La vie est alors identifiée à des temporalités propres aux systèmes organisés. Elle s'inscrit dans un processus temporel d'évolution de la matière.

Wiener (1948)¹³⁵ : « la vie est une hiérarchie structurelle d'unités en fonctionnement qui ont acquis à travers l'évolution la capacité de stocker et traiter l'information nécessaire à leur propre reproduction... ». Et également dans une version plus actualisée de la qualification de ces flux, Baltscheffsky (1997)¹³⁶ définit la vie comme flux d'énergie, de matière et d'information. De même Polishchuck (2002)¹³⁷ associera la vie à un courant (un flux) néguentropique structurellement stable fournissant un flux entrant d'énergie sous tenu par l'auto correction du code génétique.

La vie s'inscrit donc dans une histoire. Starr et Taggart (1992)¹³⁸ affirment que pour les biologistes, la vie est le produit d'évènements anciens qui ont conduit à l'assemblage de matériaux non vivants pour former la première cellule. La vie est une manière de capter et d'utiliser énergie et matière. Elle est une manière de voir et répondre à des changements spécifiques de l'environnement. La vie est la capacité de reproduire, à travers sa capacité à suivre un programme de croissance et de développement. La vie évolue, signifiant que les détails du plan d'organisation du corps, des fonctions de chaque type d'organisme peuvent changer à travers les générations successives.

¹³⁵ Wiener N., *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and in the Machine*. MIT Press, Cambridge, MA, 1947

¹³⁶ Baltscheffsky H., Major « anastrophes » in the origin and early evolution of biological energy conversion. *Journal of Theoretical Biology*, 187, 495-501, 1997

¹³⁷ Polishchuck R.F., *Life as a negentropy current and problem of infinity*. In : *Fundamentals of Life*. Déjà cité.

¹³⁸ Starr C., Taggart R., *Biology : The Unity and Diversity of Life*. Wadsworth Publications Co.Inc., Belmont CA 1992

La vie relève alors de dynamiques temporelles longues, celle de l'évolution générale des espèces, et des dynamiques d'échanges entre elles. Selon Valenzuela (2002),

« la vie est donc un processus historique de relais d'organismes anagénétiques »¹³⁹

Clark et Kok (1998)¹⁴⁰ parlent d'un biosystème comme d'un système dynamique, complexe, adaptatif qui présente un certain degré de vie.

Luisi (1998) définit l'entité vivante comme un système qui, en raison des processus internes de production de composants couplés au milieu via des changements adaptatifs, persiste durant le déroulement de son histoire.

Pour Mercer (1981)¹⁴¹, l'unique caractéristique d'un organisme vivant, ce qui le définit, est qu'il s'agit du support matériel transitoire d'une organisation possédant la propriété de survie.

Hazen (2001)¹⁴² dans la perspective ouverte par les questions relatives aux origines de la vie, propose une approche conceptuelle, potentiellement utile de définition de la vie, considérant l'origine de la vie comme une séquence d'évènements émergents, chacun augmentant ordre et complexité moléculaire.

Ce que Spencer (1884)¹⁴³ avait résumé en affirmant que la définition la plus générale et la plus complète de la vie, serait celle d'un ajustement continu des relations internes aux relations externes.

Ou encore avec Joyce (1994, 2002)¹⁴⁴, la définition pratique retenue par la NASA : « la vie est un système chimique autonome capable d'évolution darwinienne. »

¹³⁹ Transformation des espèces au cours du temps par enchaînement de populations liées par des relations directes de type ancêtre-descendants, sans subdivision, donc sans production de diversité.

¹⁴⁰ Clark O.G., Kok R., Engineering of highly autonomous biosystems: Review of the relevant literature. *International Journal of Intelligent Systems* 13, 8,748-783, 1998

¹⁴¹ Mercer E.H., *The foundation of Biological Theory*. Wiley Intersciences, New York 1981

¹⁴² Hazen R.M., *Selective adsorption of L- and D- amino acids on calcite: implication for biochemical chirality*. *Proc.Natl.Acad.Sci.* 98, 5487-5490, 2001

¹⁴³ Spencer H., *The principle of biology*. Appleton D. and Co., New York 1884

¹⁴⁴ Joyce G.F., *Foreword in : Origins of Life : The Central Concepts*. Ed. By Deamer D.W., Fleischaker G.R., Jones and Bartlet Publishers, 1994

Horowitz (1986)¹⁴⁵ avait intégré le mécanisme génétique dans cette approche : « la vie est synonyme de possession de propriétés génétiques. Tout système possédant la capacité de muter librement, de reproduire ses mutations doit presque inévitablement évoluer dans des directions qui garantissent sa préservation. Avec une durée suffisante, le système acquiert la complexité, la variété et la téléonomie que nous attribuons aux choses vivantes. »

Pour Wong (2002)¹⁴⁶ « un système vivant est un système capable de reproduction et d'évolution. Il possède une logique fondamentale, exigeant une recherche continue de performance de ses éléments de construction et d'arrangement. Cette quête (de performance) ne s'arrête que lorsque la perfection (ou quasi perfection) est atteinte. Sans cette quête (intégrée au système), les systèmes vivants n'auraient pu atteindre le niveau de complexité et d'excellence qui mérite l'appellation de vie. »

Dans une formule lapidaire, Hennes (2002)¹⁴⁷ présente la vie simplement comme un « état d'instabilité organisé. » Et Yang et al. (2001)¹⁴⁸ dans la perspective d'une définition universelle de la vie applicable à des entités matérielles ne relevant pas de la chimie organique, avancera l'idée suivante: « les caractéristiques de la vie artificielle sont l'émergence et les interactions dynamiques avec l'environnement ». Maynard Smith (1975)¹⁴⁹ mettra l'accent sur les dynamiques populationnelles : sera vivante toute population ayant les propriétés de multiplication, d'hérédité et de variation.

1.2.2 Définitions de la vie et incidence des cadres de théorisation employés.

Cette richesse d'approches est le fruit de la convergence des efforts réalisés autour d'un même objet, bénéficiant par ailleurs de l'éclairage de disciplines voisines de la

¹⁴⁵ Horowitz N.H., *To Utopia and Back: The search for Life in the Solar System*, Freeman H.W., New York 1986

¹⁴⁶ Wong J.T.F., *Short definitions of life*. In : *Fundamentals of Life*. Déjà cité.

¹⁴⁷ Hennes R.J.C. *Life is simply a particular state of organized instability*. In: *Fundamentals of Life*. Déjà cité.

¹⁴⁸ Yang B.S. and al., *Optimum design of short journal bearings by artificial life algorithm*. *Tribology International* 34,427-435,2001

¹⁴⁹ Maynard-Smith J. *The Theory of Evolution*. Penguin, Harmondsworth 1975

biologie. Cet effort induit le recours à des concepts nombreux et variés, étrangers dans un premier temps aux sciences de la vie, comme ceux de communication, de système, d'entropie, de complexité etc.

On sait *grosso modo* comment fonctionne le vivant. On sait l'analyser, en identifier les mécanismes sous-jacents propres à certaines des fonctions les plus indispensables aux manifestations vitales. Mais pour autant on ne peut affirmer disposer de la pleine compréhension de la nature vivante, dans la mesure où on ne sait pas produire le principe fondamental capable de rendre compte des manifestations multiples du vivant, de son organisation etc. Se contenter alors de définitions listant des propriétés n'en est qu'une des conséquences, et rechercher hors du champ même de la biologie l'origine du phénomène vital, de ce principe fondamental, peut constituer une parade définitionnelle au kaléidoscope présenté précédemment. Cela pose à l'évidence le problème de mise en rapport entre sciences de la vie et sciences de la matière.

A l'instar de toutes les sciences, la biologie a vocation à expliquer les phénomènes, à en identifier les causes, ce qui conduit à mettre en œuvre des démarches d'explications réductionnistes, qui *in fine* mobilisent des lois relevant de la physique et de la chimie. Et alors, les concepts familiers des sciences de la vie, organisme, gènes..., perdent leur spécificité pour ne plus être que des termes de convention à valeur instrumentale, ruinant la toute possibilité de conférer un statut essentiel à des ensembles, des tous, des organismes.¹⁵⁰

Dans une deuxième mise en perspective du foisonnement définitionnel exposé précédemment nous tenterons donc de repérer ce qui sur le plan des concepts mobilisés peut poser problème. C'est, soit parce que par une sorte d'excès de prudence les définitions ne font qu'esquisser une théorie du vivant, soit encore parce que le recours à des concepts issus d'autres champs théoriques introduisent un flou conceptuel.

¹⁵⁰ Le statut du concept de gène est à cet égard instructif. L'impossibilité de passer de la caractérisation des gènes à leur définition est illustrée par la proposition de Singer et Berg 1991. Voir Portin Petter, Historical Development of the Concept of the Gene. *Journal of Medicine and Philosophy*. 2002, Vol. 27, No. 3. également Burian, On conceptual change in biology : The case of the Gene. *Cambridge University Press*, 2004. Gayon Jean. La génétique est-elle encore une discipline? *M/S : médecine sciences*, 2004, Volume 20, numéro 2

- ***Essais d'identification de liens causaux, les définitions listes (ou pseudo définitions) : une théorie du vivant en filigrane***

Ces définitions sont donc constituées autour de certaines des propriétés du vivant qui paraissent les plus fondamentales. Mais ce qui manque dans ce type d'approche, c'est l'énoncé d'une condition nécessaire et suffisante pour qu'un objet puisse être qualifié de vivant.¹⁵¹ Cette absence est alors comblée par le recours à des listes ordonnées renvoyant en filigrane à des liens causaux. Par le poids de certaines des propriétés retenues, de leurs articulations, on passe ainsi de descriptions à plat, à des listes ordonnées préfiguration de liens causaux.

- *Des descriptions aux ... (listes ordonnées : essais d'identification de liens causaux)*

Ces définitions, réduites à une description simplifiée de la vie, portent le risque d'exclure ce qui ne relève pas de la liste stricto sensu. Par exemple caractériser les phénomènes vivants par la capacité de reproduction d'un système, conduit au paradoxe du mulot, organisme bien évidemment vivant mais sans descendance.

A titre d'exemple, nous avons présentés la définition bâtie sur une liste de propriétés hétérogènes proposée par d'E. Mayr (1992)¹⁵². La vie y est définie comme répondant à huit critères (voir supra). Sur le fond, ces descriptions ou définitions listes constituent-elles vraiment des définitions ? Car dans ce type d'approche, on acte le fait que la vie, le phénomène vivant ne peut se définir à partir d'une caractéristique unique absente dans le monde inanimé.

Ainsi Schuster (1984) : « c'est la présence simultanée de toutes les propriétés caractéristiques...et éventuellement d'autres qui constituent l'essence d'un système biologique » et encore Schultze-Makuch et Irwin(2004) : « Il n'y a pas de propriété

¹⁵¹ Sur cet aspect de conditions nécessaires et suffisantes, voir le débat autour de la définition de la vie comme autopoïèse. Lazcano A., Towards a Definition of Life : The Impossible Quest? *Space Science Reviews*, Volume 135, Nos 1-4, 2008. Egalement:: Luisi Pier Luigi, Autopoiesis : a review and a reappraisal. *Naturwissenschaften*, 2003,90

¹⁵² Mayr Ernst, *The Growth of Biological Thought: Diversity, Evolution and Inheritance*. Cambridge, Harvard University Press, 1982

caractéristique qui soit à la fois intrinsèque et unique de la vie. Nous devons plutôt affirmer que la vie correspond à certains standards ou que la vie est qualifiée par la présence collective d'un certain nombre de caractéristiques ».

Ces définitions critères ou définitions paramétriques, identifient donc une liste des propriétés les plus caractéristiques de la vie. Elles reposent sur une sorte de postulat de leur connexion nécessaire sans d'ailleurs y identifier une cause qui leur pourrait être commune. Ce type de définition, d'ailleurs assez courante, se retrouve dans les dictionnaires et les encyclopédies, les manuels comme présentant les définitions les plus compréhensibles et les moins spéculatives de la vie, les plus proches de l'expérience vécue.

Dans ces listes, les caractéristiques usuellement retenues sont l'ingestion de nutriments et d'énergie fournis par l'environnement, le métabolisme, la croissance, la reproduction, l'adaptation, l'hérédité, l'évolution, la complexité qui accompagne des caractéristiques plus « élevées » telles que réceptivité, mouvement, irritabilité, comportement, conscience.

D'autres propriétés, moins phénoménologiques, plus liées à la matérialité du système vivant, à ses différents modes d'organisation permettent également de dresser des listes de caractéristiques singulières. Il s'agit par exemple de caractéristiques incluant les réactions auto catalytiques, les échanges de matière, la chiralité, la présence d'une membrane, les potentiels membranaires, les récepteurs des membranes, le transfert d'électrons et d'énergie, les déséquilibres, la décroissance de l'entropie, la rétroaction, les boucles de rétroaction et l'homéostasie, les programmes et codes génétiques, le traitement de l'information etc.

Ce sont alors ces différentes propriétés décrites parfois dans des contextes spécialisés qui sont combinées pour livrer des définitions de la vie et qui peuvent dès lors servir de définitions de travail dans différents discours scientifiques.

Mais il ne s'agit pas de définitions à proprement parler, car malgré leur attractivité, elles sont très étroitement dépendantes des avancées des sciences de la vie et ne différencient pas les propriétés causales de celles qui en dériveraient (conséquentes ou subséquentes).

Cleland et Chyba (2002)¹⁵³ notent que ce type d'approche ne fournit pas d'indication sur les conditions nécessaires et suffisantes de manifestation des propriétés vitales, or c'est ce que l'on attendrait logiquement d'une définition. En effet, de nombreux systèmes non vivants partagent certaines des propriétés participant des phénomènes rencontrés parmi les vivants. Ce sont par exemple la transmission d'information dans la formation des minéraux, l'adaptation dans les minéraux d'argile, les programmes de

¹⁵³Cleland C.E.; Chyba C.F., *Defining Life. Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 2002, 32: 387–393

calculateurs capables de répliquions, la croissance dans les incendies, la présence de frontières terrestre des océans etc.

Par ailleurs de nombreux organismes vivants ne partagent pas l'intégralité des propriétés énoncées dans ces listes : vie latente, organismes stériles etc. Notons également que des termes comme croissance, reproduction etc. reçoivent des sens différents dans ces différentes approches.

Finalement les caractéristiques rassemblées dans les définitions de ce type constituent autant de vues différentes d'un même phénomène appelé « vie ». Elles sont prises sous différents angles, avec différentes profondeurs d'analyses et portent néanmoins sur une même réalité produite par des structures matérielles singulières. Reste cependant que ces vues peuvent être enrichies par la hiérarchisation des propriétés, l'organisation des énoncés qui différencierait les manifestations secondaires de celles essentielles aux manifestations de la vie.

- *(Des descriptions aux ...) listes ordonnées : essais d'identification de liens causaux.*

C'est en somme par analogie avec ce qui se passe dans le monde des sciences physiques dans lequel des propriétés comme les charges électriques, la masse, la gravité, le spin, la force électromagnétique sont considérées comme plus fondamentales que la température, l'énergie, la viscosité, la force d'une liaison chimique ou la forme d'un cristal. Ces dernières sont dérivables des premières. Et c'est sur ce modèle que l'on tente de présenter des caractéristiques de vie qui seraient également plus fondamentales (car causales ou de transitions de phases) et d'autres qui en seraient dérivées (déterminées ou émergentes). Ainsi même si des caractéristiques comme la balance énergétique, la préservation de l'architecture moléculaire et de l'architecture cellulaire, le métabolisme, la réplication, la reproduction, la complexité, l'évolution darwinienne, l'homéostasie, le mouvement, le code génétique, la réponse à des stimuli, constituent des marqueurs de discrimination de la vie, ils ne sont pas primordiaux. Ces caractéristiques ne sont finalement que la conséquence d'autres circonstances préexistantes, la résultante ou le produit de la manière dont fonctionne le vivant, elles n'en constituent pas par leur seule manifestation une confirmation de la présence de vie.

Pour aller au-delà de la juxtaposition de propriétés, de caractéristiques particulières et englober l'ensemble des formes de vie au sein de la définition d'un concept de vie, il est nécessaire de viser la source même de coexistence de ces propriétés hétérogènes. Il faut aller plus loin, approfondir et rechercher des principes plus profonds, spécifiques aux systèmes vivants qui leur permettent de grandir, de métaboliser, de s'adapter.

On recherchera donc une hiérarchie causale de propriétés et on tentera d'identifier et de traiter leurs éventuelles connexions en série ou en parallèle. C'est par exemple, l'adaptation comme conséquence de l'évolution, elle-même conséquence de la reproduction que l'on théorise comme transmission d'information avec erreur et sélection. Celle-ci est alors la manifestation particulière d'une propriété générale d'un système vivant qui est l'acquisition, le stockage, le traitement et l'utilisation d'informations. C'est finalement l'information génétique produite par un réseau homéostatique circulaire au sein de l'organisme qui dans cette perspective, lie l'ensemble des propriétés vitales. L'information génétique est alors causalement connectée à deux autres propriétés fondamentales et caractéristiques de la vie : l'utilisation d'énergie et la création d'ordre.

Ces liens causaux sont explicités dans certaines définitions de la vie à l'exemple de Lahav et Nir (2002). Ces auteurs définissent l'entité vivante comme «... un ensemble de molécules spatialement organisé ; recourant à des boucles de rétroaction informationnelles moléculaires dans l'utilisation de matériaux et d'énergie issus de l'environnement et rendant possible sa croissance ». Egalement Gusev (2002) : « la vie est un processus chimique cyclique, dépendant de l'énergie, qui résulte d'un accroissement de complexité fonctionnelle et structurelle des systèmes vivants ».

Mais déterminer quelles sont les caractéristiques qui seraient premières et celles qui seraient secondes ou quels sont les processus qui inter réagissent dans un réseau causal est loin d'être aisé.

Notons que cette recherche de hiérarchisation des caractéristiques vivantes est au cœur des interrogations de l'astrobiologie, des hypothèses relatives aux origines de la vie etc.

Un des problèmes de l'approche paramétrique réside également dans l'incapacité à rendre compte de l'histoire lointaine de la vie. Les définitions paramétriques présentent la vie comme une collection d'attributs non usuels, une coïncidence spatiotemporelle de propriétés remarquables et non comme une dynamique d'accrétion qualitative de propriétés, ponctuée de nouveautés apparaissant par étapes, comme une chose en évolution constante avec l'environnement. Les approches évoquées tendent à ignorer les conditions et les facteurs qui conduisent à ces propriétés. De ce fait elles ne permettent pas de rendre compte de formes de vie « pré biotiques », ou d'intégrer des formes de « pré vie » comme pertinentes dans l'explication des origines de la vie. Cela est encore amplifié lorsqu'on intègre dans la liste des propriétés du vivant des caractéristiques très évoluées comme le fonctionnement de réseaux hiérarchiques, la phosphorylation oxydative,¹⁵⁴ la réplication semi-conservative, l'évolution darwinienne etc.

Cette absence de mise en perspective historique pose problème dans les scénarios d'origines de la vie. Car, *de facto*, on est conduit à postuler un démarrage de la vie à partir d'une propriété unique, qui acquiert le statut de propriété fondamentale. Ce seront alors des scénarios faisant débiter la vie soit par le métabolisme, soit par un système génétique soit encore par la formation de compartiments, toutes conditions peut être nécessaires mais jamais suffisantes à elles seules pour caractériser un objet de vivant.

- ***Définitions et recours à des concepts issus d'autres champs disciplinaires : problèmes et sources d'interrogations nouvelles.***

La diversité des définitions listées est révélatrice du foisonnement des approches. Elles juxtaposent des propriétés de différents niveaux, et sont formulées pour certaines d'entre elles dans des cadres disciplinaires ne relevant pas directement de la biologie. Et l'absence d'intégration de ces approches pluridisciplinaires autour d'un concept unifié de la vie, grâce à une théorie autonome de la vie, du vivant pose alors problème.

Pour prendre un exemple simple, on sait définir le mercure comme l'élément de

¹⁵⁴ Chez les organismes aérobies, la phosphorylation oxydative produit l'ATP, molécule énergétique entrant dans le métabolisme.

numéro atomique 80, l'eau comme la molécule d' H_2O . On ne parle plus des propriétés phénoménologiques du mercure, de l'eau comme liquide, comme solide, ou comme gaz, mais partant du simple fait de définir l'eau comme « H_2O », le mercure comme l'« élément atomique 80 », on renvoie nécessairement à toutes les propriétés physiques et chimiques associées à cet atome ou à cette molécule, et cela suffira également à identifier ces matériaux dans des conditions de pression et de température qui ne seront pas celles rencontrées sur la surface du globe terrestre.

Ce type de définition, sous-tendue par une place précise dans le tableau des éléments périodiques, résumé de la structure atomique s'agissant du mercure, ou résumant pour l'eau dans une formule tous les acquis de la chimie et de la physique, semble pour l'instant constituer un horizon inaccessible à la définition du vivant. Est-ce lié au fait que, d'un côté, nous disposerions d'un contexte scientifique relativement délimité, constitué par la chimie et en partie par la physique via la théorie des liaisons chimiques ? Alors que s'agissant de la vie, du vivant, ce n'est pas uniquement à la biologie, à la biochimie que l'on empruntera les concepts, mais également à la thermodynamique, la chimie des cycles catalytiques, la théorie de l'information, la cybernétique etc. associant d'ailleurs des schèmes d'explications probabilistes (interactions moléculaires aléatoires), déterministes et mécaniques etc. afin d'appréhender une réalité infiniment plus foisonnante, plus labile que ne l'est celle de l'eau ou du mercure.

Le problème commun à ces définitions ainsi qu'aux définitions essentialistes est celui de l'imprécision, d'absence de consensus dans le recours à des termes comme information, organisation, complexité, ordre, auto organisation, autonomie, métabolisme...et dont l'expression reçoit des sens différents selon la discipline qui l'emploie. Le flou, induit par le recours à des termes non définis, constitue d'ailleurs une des causes d'absence de ce consensus définitionnel.

Mais ne risque-t-on pas, à exiger que tous les termes d'une définition soient eux même définis, de s'engager dans une régression à l'infini ? Ici, ce que l'on pointe, c'est plutôt l'incorporation non spécifiée de termes provenant d'autres disciplines et qui, de ce fait, perdent de leur précision, de leur acuité. Cependant, le recours à ces termes conserve une utilité, un mérite, celui d'identifier un problème, une question sans toutefois y répondre de manière adéquate, sans nécessairement en fournir l'exacte représentation.

- *Variations autour des concepts d'ordre, de complexité, d'organisation*

Le recours aux vocables d'ordre, d'organisation, de complexité, renvoie aux intuitions nourries par leur usage dans le langage courant et qui, selon les contextes disciplinaires, reçoivent des interprétations différentes. Par exemple, dans le langage courant, ordre renvoie à un arrangement donné qui dépend de la vision de l'observateur. L'organisation renvoie à l'état d'un corps structuré, à cette spécificité du vivant comme organisme dont les parties existent en fonction du maintien de l'ensemble. Et le lien avec la complexité s'installe dès lors que l'on tente de saisir les interactions entre ces différents niveaux d'organisation. La complexité caractérisera alors la co-dépendance entre ces différents niveaux qui, par ailleurs, peuvent correspondre à des niveaux d'investigation ressortissant à des disciplines scientifiques différentes. Plus généralement les interactions entre parties -ce qui participe de l'organisation- sont qualifiées de complexes par la présence de relations causales circulaires posant des problèmes épistémologiques propres aux vivants. Et dans ce contexte l'ordre renvoie à un double sens. D'abord celui mis en évidence par la démarche scientifique elle-même qui vise à rendre intelligible les relations existantes entre les éléments formant le tout de l'organisme mais aussi ce qui signe la singularité de l'objet matériel vivant dans son opposition à un environnement général désordonné.

Ainsi, les affirmations que « les systèmes vivants sont des systèmes qui accroissent leur capacité à créer de l'ordre au sein d'un environnement moins ordonné » (Libbert 1982) ou encore « on rencontre ordre et organisation dans la nature, dans les communautés vivantes qui occupent chaque niche ainsi que dans les organismes vivants eux même » (Beck et al 1991) renvoient à plusieurs choses. A un environnement qui implicitement serait désordonné au sens où il serait dominé par l'agitation moléculaire et également à des systèmes qui eux seraient organisés au sens de l'organisme dans lequel des parties s'ajusteraient entre elles pour réaliser le « tout » du vivant. C'est ce sens qui est retenu par Babloyanz (1986) : « les organismes vivants sont caractérisés par de l'ordre fonctionnel et morphologique ». Cela conduit Capra (1997) à énoncer un principe général : «...par le monde vivant, le chaos est transformé en ordre ». Ce que l'on

rapprochera de l'affirmation de Schrödinger : «...la vie paraît être un comportement ordonné et règlementé de la matière, comportement qui n'est pas basé exclusivement sur la tendance de passer de l'ordre au désordre, mais basé en partie sur un ordre existant qui se maintient ».¹⁵⁵

Le tandem ordre-désordre ancre également la compréhension du vivant dans le champ de la thermodynamique. Le concept d'entropie et son lien avec l'agitation moléculaire se retrouve en effet dans nombre de définitions de la vie. Ainsi Polishchuck (2002) associe la vie à un courant structurellement stable de néguentropie. Markó (2002) complètera en précisant que, du point de vue thermodynamique, la vie est un mécanisme qui recourt à des processus chimiques complexes permettant de diminuer l'entropie.

Ordre et désordre constituent une façon de caractériser l'entropie depuis les travaux théoriques de Boltzmann. C'est le concept de néguentropie chez Schrödinger qui résume la situation du vivant par cette formule : « un organisme se « nourrit » d'entropie négative » pour signifier que tous les processus propres au vivant concourent à diminuer son entropie au détriment de celui de son environnement. En référence à l'approche statistique de l'entropie, le vivant a donc tendance à augmenter l'organisation moléculaire en son sein, au détriment de l'accroissement du désordre moléculaire dans l'environnement. Le fondement possible du rapprochement entre ordre et entropie est donc que la structure vivante accroît ou maintient un ordre, ce qui se traduit par une diminution locale de l'entropie au détriment de celui de l'environnement.

Mais l'approche commune du vivant vise d'abord l'ordre perçu par l'observateur, et ce rapprochement de deux concepts d'ordre au sein de la même dénomination constitue une source possible de confusion. Ce sont en effet deux notions d'ordre qui sont véhiculées par le même mot. L'une, celle du biologiste, réfère à l'organisation spatiale de la cellule, ses organites et autres structures cellulaires, à l'organisme et à son organisation en composantes fonctionnelles ; alors que l'autre renvoie à des états thermodynamiques dont les concepts d'ordres ne sont pas directement superposables au

¹⁵⁵ Schrödinger Erwin. *Qu'est-ce que la vie ? De la physique à la biologie*. Traduction française, Christian Bourgeois Editeur : 1986

précédent. Et ici, dans le contexte de la thermodynamique statistique, l'entropie c'est la probabilité d'un état donné qui mesure le degré de désordre au sein d'un système au niveau microscopique.

L'invention des structures dissipatives¹⁵⁶ vise à explorer un champ différent qu'illustre cet oxymore. L'opposition entre structure, évoquant l'ordre, l'organisation, et dissipation renvoyant à la dégradation, au désordre, à l'application du 2^e principe de la thermodynamique, à la tendance de tout système matériel à évoluer vers un état d'équilibre, état de désordre maximal, caractérise la tension entre deux principes qui s'opposent pour constituer un système en équilibre métastable ou stationnaire. Appliqué aux structures vivantes, ce concept offre cette fois-ci une façon cohérente d'articuler ordre, entropie, état stationnaire. Comme le vivant, un système dissipatif est ouvert, opère loin de l'équilibre thermodynamique dans un environnement avec lequel il échange matière et énergie. Et ce système se stabilise par la consommation d'énergie provenant de l'environnement.

Caractériser le vivant comme structure dissipative a donc le mérite d'une cohérence conceptuelle, tout en ne livrant pas les fondements d'une définition univoque de la vie : cellules de Bénard, réactions de Belousov-Zhabotinsky,¹⁵⁷ sont autant d'exemples de systèmes dissipatifs dont la stabilité résulte d'un flux d'énergie ou de matière constant. Pour résumer, dans les systèmes vivants, les forces de l'entropie sont dominées par des réactions et événements cellulaires qui peuvent être créateurs d'ordre mais gros consommateur d'énergie et qui éloignent le système de l'état d'équilibre (thermodynamique). Et tout se passe alors comme si, en appliquant le concept d'ordre, d'entropie à un ensemble complexe fait d'hétérogénéité, on ne faisait que caractériser l'état de la cellule (ou de l'organisme) comme imposant à la somme des états « locaux » hétérogènes, c'est-à-dire celui de chaque système moléculaire pris dans son état thermodynamique à un instant donné, une résultante finale garantissant le

¹⁵⁶Prigogine I. ; Stengers I., *La Nouvelle Alliance*. Gallimard : 1986

¹⁵⁷Paradigmatique des systèmes chimiques oscillants, la réaction de Belousov-Zhabotinsky du nom des chimistes qui successivement ont travaillé sur ce type de réactions. Elle met en jeu l'oxydation de composés organiques par des bromates.

fonctionnement hors équilibre.

Ordre et complexité sont également associés pour caractériser la particularité du vivant. Ce dernier terme véhicule à nouveau plusieurs sens. Le plus courant vise le caractère d'un objet constitué par les interactions non analysables entre différents niveaux d'organisation. La complexité renvoie ainsi aux difficultés épistémologiques rencontrées pour rendre compte dans une même approche théorique de ces différents niveaux d'organisation inter reliés. Et dans des champs disciplinaires spécialisés, comme en théorie de l'information, la complexité d'un objet fini est identifiée à la taille minimale de description algorithmique de l'information ou du programme permettant de le décrire. (Kolmogorov 1965).¹⁵⁸ Complexité peut dès lors concerner plusieurs types d'approches épistémologiques : l'une qui renvoie à un objet organisé, structuré qui nécessiterait beaucoup d'informations pour accéder à sa compréhension, et l'autre qui renvoie à l'inverse à ce qui est déstructuré, désordonné, aléatoire, opposant ainsi une complexité aléatoire à une complexité organisée.¹⁵⁹

L'incorporation de ces notions, définies et précisées dans des contextes disciplinaires ne relevant pas au départ des sciences de la vie, est donc source de flou et d'approximation. Ainsi, à l'exemple de la définition proposée par Orgel (1973), Auber (2002) recourt à la complexité pour caractériser le vivant : « Les organismes vivants se distinguent par leur complexité spécifique » et « la vie est un processus qui organise la matière vers des niveaux plus élevés de complexité et qui maintient cette complexité. » Ou encore : « même le plus simple organisme présente un niveau de complexité non usuel » (Pályi et al. 2002). Dans ces définitions quel sens faut-il donner à complexité, à complexité spécifique ? Et comment distinguer des degrés de complexité ?

Dans « l'ordre à partir du bruit » (Foerster 1960) ou « l'ordre à partir du chaos » (Prigogine et Stengers (1984) et les travaux de Kauffman (1993)¹⁶⁰ sur l'origine de l'ordre,

¹⁵⁸ D'après Delahaye Jean-Paul, *Complexité aléatoire et complexité organisée*. Versailles : Editions Quae, Sciences en questions, 2009

¹⁵⁹ On retrouve ainsi la différence entre complexité aléatoire et complexité organisée. Delahaye Jean-Paul, *Complexité aléatoire et complexité organisée*. Déjà cité.

¹⁶⁰ Kauffman Stuart. *Origins of Order: Self-Organization and Selection in Evolution*. Oxford University Press: 1993.

la notion d'ordre est souvent associée à la régularité de séquences périodiques d'éléments, alors qu'un arrangement irrégulier est associé à la complexité. Yockey (2002b) dira que la « complexité est une échelle dont l'une des extrémités est l'ordre et l'autre l'aléatoire ».

Egalement : « la vie est la propriété de la matière qui résulte du couplage cyclique de bioéléments en solution aqueuse déterminé *in fine* par l'énergie radiante, afin d'atteindre la complexité maximale » (Folsome 1997), et Capra (1997) parlera d'«un monde vivant se déployant vers un accroissement d'ordre et de complexité». Hazen (2001) évoque «une approche conceptuellement utile (qui) est de considérer l'origine de la vie comme la conséquence d'évènements émergents, chacun ajoutant de la complexité et de l'ordre moléculaire ».

Dans la définition suivante, la complexité n'est plus liée à un accroissement de l'ordre mais à l'apparition de qualités nouvelles, d'une diversité : « la vie est une nouvelle qualité donnée à un système chimique organique par un changement dialectique résultant d'un accroissement dans la quantité de complexité du système » (Kolb 2002).

Finalement les confusions tournent autour d'une perturbation du jeu de langage, confondant l'ordre avec l'organisation, elle-même confondue avec la complexité qui est interprétée comme diversité.

Dans le prolongement du recours à la complexité, à l'organisation, c'est également le terme auto-organisation désignant un processus d'émergence vers la vie qui peut poser problème. Par exemple : « La vie est une propriété résultante de l'auto organisation collective de phénomènes catalytiques » (Kauffman 1993) qui hors contexte peut renvoyer à une propriété intrinsèque de la matière. Il serait nécessaire de préciser en quoi l'auto-organisation diffère alors de l'organisation, ou encore de l'organisation sous contrainte (hétéro-organisation) telle qu'on la rencontre dans la formation des cellules de Bénard.¹⁶¹ Hors contexte explicatif, ne renvoie-t-on pas à une propriété «miraculeuse » de la matière,

Ainsi que Kauffman Stuart A., *At home in the universe : the search for the laws of self-organization and complexity*, Oxford university Press, 1995

¹⁶¹ Cellules, disposées régulièrement, apparaissant dans une couche de fluide dont la face intérieure est plus chaude que la face supérieure et dues aux phénomènes de convection. (Larousse)

capable de s'organiser de son propre chef ?

- *Cybernétique, information, génétique et système.*

Le recours aux vocables des sciences du traitement de l'information, qui a fait florès avec les développements de la biologie moléculaire, constitue une autre source d'approximations dans la façon de rendre compte de la spécificité des organismes vivants. Informations, données, programmes, traitements des signaux, bruits, régulations, constituent autant de termes issus de ces disciplines et employés soit sous forme métaphorique soit directement pour rendre compte de mécanismes causaux opérant au sein des systèmes vivants. Le recours à ces termes possédant des sens qui diffèrent selon le contexte scientifique a servi fondamentalement à réinterpréter des relations causales finalisées dans le cadre de systèmes régulés, de systèmes cybernétiques.

Par exemple chez Wiener (1948) : « la vie est une hiérarchie structurée d'unités en fonctionnement qui ont acquis à travers l'évolution la capacité de stocker et traiter l'information nécessaire à leur propre reproduction... »

Lwoff (1962) définira la vie comme système traitant l'information, système dans lequel la génétique acquiert le rôle central de stockage d'information. Dans la même approche, Dyson (1999) définira la vie comme un système matériel qui peut acquérir, stocker, traiter et utiliser de l'information afin d'organiser son activité.

En biologie (moléculaire), le terme d'information a d'abord été employé sous forme métaphorique. En 1950, le recours à ce terme est signifié par des guillemets. Les travaux ultérieurs ont conduit au développement de la métaphore informationnelle : code génétique, programme génétique, modèle de traitement. Dans une acception large, cela désigne différents niveaux de contrôle de circuits de signalisation et de boucles de rétroactions. La vie comme information, c'est alors la vie qui relève d'une théorie des opérations contrôlées, avec ses régulations organiques, ses notions de *feedback* ou boucles de régulation. D'abord d'une manière simplifiée, autour des métaphores du « programme génétique » pour évoluer vers une vision plus complexe conférant à toute la cellule la fonction de traitement de l'information. Et dans une vision extensive, c'est tout le vivant qui est alors pris comme un système traitant de l'information.

Le processus de traitement de l'information au sein d'un système régulé remplace la description du processus de lecture de l'ADN décrit par la génétique moléculaire. Par

exemple, lorsque Keller (1995) décrit sommairement ce processus dans sa définition de la vie : « l'ADN fait l'ARN, l'ARN fait les protéines et les protéines nous font », l'expression phénotypique apparaîtra comme le résultat d'une chaîne unidirectionnelle de traitement d'informations (c'est à dire de séquences de nucléotides ordonnées). Le processus causal est alors réinterprété à la lumière des théories de traitement de l'information, information circonscrite à la lecture d'un code. Pour Yockey (2002), c'est d'ailleurs la présence même de ce code génétique qui sépare le règne du vivant de celui du non-vivant.

Cette approche du vivant sous l'angle du traitement de l'information est alors vu comme un processus linéaire de transmission de l'information dans un sens strictement déterminé, allant des séquences d'acides nucléiques vers les polypeptides (Crick 1958). L'information ici, est portée par la séquence de nucléotides codante. Et c'est pour une telle séquence que seront étudiés la qualité de la réplication analysée sous l'angle de la qualité de transmission de l'information dans le processus de traitement (bruit etc.), son rôle éventuel comme séquence régulatrice etc.

L'interprétation des mécanismes moléculaires en référence à un contenu informationnel peut donc relever de métaphores présentant les séquences d'acide nucléique comme des programmes, comme un plan de fabrication se transmettant de génération en génération. Ainsi cette définition d'Abel(2002) : « toute vie connue ainsi que la vie artificielle est pilotée par un programme ».

En abandonnant la métaphore informationnelle Yockey (2002) reviendra à une formulation causale directe reliée aux mécanismes chimiques en jeu : « dans la matière vivante les réactions chimiques sont dirigées par des séquences de nucléotides, des ARNm ».

On essaie également d'aller au-delà de la métaphore en réintroduisant du sens dans le contenu de l'information. Par exemple le sens du « message » inscrit dans les séquences nucléotidiques sera donné par la relation à leur « correspondant » peptidiques : « les codes génétiques sont porteurs de sens en raison des caractéristiques qu'ils communiquent au système dans lequel ils résident » (Shulze-Makuch et al. 2002) ou encore « l'ADN est porteur de sens en raison des segments d'ADN exprimés (exon) qui sont lus par la machinerie moléculaire de la cellule » (Shulze-Makuch et Irwin 2004).

L'usage du terme information introduit donc du sens dans ce qui n'était qu'une

succession plus ou moins ordonnée de séquences monomériques. Les gènes deviennent alors porteurs d'une « connaissance » en relation avec des facteurs environnementaux : «on peut dire que l'ordre observé dans les séquences génomiques, la manière dont s'organise leur expression, incorpore la somme de toutes les informations que le système a accumulé à travers l'histoire de ses interactions internes et externes » (Guimarães, 2002). Ce que complètent Lacey et al. (2002) en affirmant qu'une «cellule doit être capable de représenter son environnement - une sorte de réalité virtuelle de l'environnement- encodé au sein de son architecture moléculaire ». Les gènes (au sens de séquences actives d'ADN) constituent alors une sorte de cause finalisée dirigée vers le résultat même qui aide à les réaliser.

Nous sommes alors en plein géno-centrisme, dans l'impérialisme génétique induisant par ailleurs des impasses théorique.¹⁶²L'ère ouverte par l'invention de la structure de l'ADN créant les bases théoriques et paradigmatiques du gène a glissé progressivement vers une théorie de la vie réduite à l'action unique d'agents génétiques et de leurs substituts protéiniques, en faisant l'impasse sur les propriétés résultant des interactions complexes et non linéaires de ces agents (Strohman 1997).

Delbrück (1971) n'affirmait-il pas que le concept de « premier moteur » s'appliquait parfaitement à l'ADN ? Finalement, pour reprendre l'expression de Tsokolov,¹⁶³les gènes apparaissent comme étant le «premier moteur» de tous les organismes vivants : « Ils agissent, créent des formes et des développements et restent inchangés durant le processus ». Un pas supplémentaire dans le recours aux théories de l'information sera franchi lorsqu'on confèrera au vivant la capacité à interpréter les interactions avec l'environnement comme des signes ayant une valeur (Sharov 1998, dans une approche sémiotique de la vie).

Ces exemples illustrent donc l'affirmation de Gatlin (1972) : « la vie est faite de trois éléments de base, matière, énergie et information. » Ils mettent l'information au cœur

¹⁶² Voir sur ce thème : Morange Michel. *Les secrets du vivant. Contre la pensée unique en biologie*. Editions La Découverte, Sciences et société: 2005

¹⁶³ Tsokolov Serhiy A., Why Is the Definition of Life So Elusive? Epistemological Considerations, *Astrobiology*,2009,Volume 9, Number 4

même de la définition du vivant, que l'on décrit alors comme système accumulant de l'information et se perpétuant dans le temps.¹⁶⁴

Cette approche forte de l'information génétique, géno-centrée, a été largement critiquée comme ne pouvant rendre compte à elle seule du développement de l'organisme vivant. Pour Oyama et al. (2001), placer la finalité dans les organismes à travers l'information comme « in-formation » ou « instruction » et conserver la métaphore du programme génétique ne permet pas d'expliquer le développement des organismes (Oyama et al. 2001).¹⁶⁵ L'information ne réside pas dans un programme génétique instructionnel, fixe et immuable, mais se construit au cours du développement en interaction avec le contexte environnemental.

Les définitions du vivant comme « système traitant de l'information » peuvent être réutilisées dans une perspective différente lorsque l'expression des gènes n'est plus réduite à la lecture de séquences signifiantes de polymères biologiques. Les gènes ne codent plus, n'exécutent plus de programme, ne contrôlent ni ne pilotent le métabolisme ou l'homéostasie. Et c'est alors toute la cellule qui se transforme en système intégré de traitement des informations :

l'ADN est une molécule inerte, parmi les molécules les moins réactives, chimiquement inertes du monde...la séquence linéaire de nucléotides de l'ADN est utilisée par la machinerie cellulaire pour déterminer laquelle des séquences d'acide aminé doit être incorporée dans une protéine, et déterminer quand et où une protéine doit être synthétisée (Lewontin 1992).

Les gènes ne sont plus des agents actifs et c'est plutôt toute la machinerie de l'organisme qui décide quels sont les gènes qui doivent être exprimés, quand et où, et quelle information doit être extraite d'une séquence nucléotidique donnée. Au sens propre, le système vivant comme un tout n'est pas divisé en éléments d'ordre premier ou second ou de contrôle. L'approche analytique n'est plus que le moyen commode

¹⁶⁴ L'approche centrée sur la capacité d'accumuler de l'information par un système chimique sera au cœur des premiers travaux d'Eigen en 1971 que nous exposerons en 3^e partie.

¹⁶⁵ Moss L. , *Deconstructing the gene and reconstructing molecular developmental systems*, in Oyama, S., Griffiths, P., Gray, R. (éds.) : *Cycles of contingency, developmental systems and evolution*, London: MIT Press, 2001.pp. 85-97

permettant à l'esprit humain de marquer les éléments participant aux processus vivants. Et dans ce cadre, les processus examinés au sein de l'organisme seront analysés comme des cycles sans fin mettant en jeu plusieurs éléments. Dans cette démarche qui recourt à l'approche informationnelle, il n'y aura pas de produit final mais un principe d'information cyclique d'usage universel pour l'organisation biologique, valide à tous les niveaux d'observation : moléculaire, cellulaire, physiologique voire social.

Au-delà du géno-centrisme implicite ou explicite, ces approches du vivant posent donc problème quant à la pertinence du recours au terme d'information. En effet quel sens faut-il lui donner et sur quel mode y recourt-on? S'agit-il du contenu de l'information, c'est-à-dire de la structure et du sens même de ce qui est transmis, donc de la sémantique véhiculée par des ensembles matériels ; de la qualité de la transmission de ce contenu, du signal utilisé au sein de boucles de régulations ? Pour résumer s'agit-il plutôt d'un usage métaphorique ou vise-t-on à caractériser le réel en jeu?

Le recours à un terme dont le sens est très dépendant du contexte d'utilisation pose évidemment problème et ce d'autant plus qu'il est employé sous un mode métaphorique, sans précision par rapport au contexte scientifique originel. Ainsi avec Shannon et Weaver, la théorie de l'information réfère à des séquences d'éléments ordonnés pour lesquels se pose la question de la fidélité de leur transmission alors que dans les sciences cognitives, l'information est identifiée à la connaissance en général, au contenu sémantique de ce qui est échangé.

Une manière de s'affranchir du flou véhiculé par la métaphore (veut-on évoquer la théorie du signal, celle de programme etc. ?) serait de spécifier et caractériser directement la permanence d'une structure répliquative porteuse d'ordre avec une définition comme : « un être vivant est un système ouvert et codé au sein duquel se déroulent des réactions chimiques qui lui permettent de maintenir son intégrité, de réguler ses échanges et de se reproduire. »¹⁶⁶

¹⁶⁶ Reisse Jacques, *La longue histoire de la matière*. Presse universitaire de France : 2006

Ou encore, en assumant le recours à la théorie de l'information et des sciences informatiques et en précisant son champ d'application, sa contribution à la définition de la vie peut être plus précise. Par exemple avec Yockey (2002) :

Le caractère linéaire et digital du génome autorise l'emploi de la théorie de l'information et d'autres approches mathématiques concernant les séquences ou succession de symboles afin de disposer de données quantitatives et non plus uniquement ad hoc concernant des problèmes significatifs en biologie moléculaire. La caractéristique linéaire et digitale du génome rend possible les calculs et les opérations informatiques,

tout en émettant une réserve : « ... mais est ce que les séquences de base de l'ADN en constituent-elles alors la seule information qui doit être prise en compte pour définir la vie ? »

Finalement et paradoxalement le recours aux concepts issus des sciences de l'information ne clarifie pas vraiment la compréhension de la vie, la connaissance du vivant.

1.3 Définir la vie dans les sciences de la vie : à la recherche d'une théorie du propre du vivant

Ce moment d'introduction empirique exploitant les approches définitionnelles recensées dans la littérature scientifique doit être complété par la présentation des points saillants à prendre en compte pour pouvoir cerner ce qui constitue l'originalité, la particularité des objets matériels dotés des propriétés vitales. C'est en somme, au vue des efforts déjà réalisés, rédiger le cahier des charges d'une « bonne définition » de la vie ou du vivant.

Cet exercice ne va pas de soi tant le phénomène réel reste insaisissable sur le plan théorique. Et dans l'état actuel des sciences biologiques ce sujet reste largement ouvert. Il s'agirait de passer de définitions listes, de descriptions, à des définitions caractérisant le phénomène vivant par les dynamiques, les mécanismes, l'organisation fondamentale des systèmes matériels qui l'exprimerait. Ces définitions et donc ces explicitations de la nature fondamentale de la vie devraient de même livrer un éclairage sur le processus ayant conduit à la formation de tels systèmes. Elles¹⁶⁷ devraient notamment être cohérentes avec les connaissances actualisées en biologie, physique, chimie ; être universelles afin de cerner les phénomènes qui relèvent de nécessités nomologiques et discriminer ceux relevant de phénomènes contingents ; être suffisamment spécifiques pour inclure toutes les formes de vie et pouvoir fournir des critères opératoires permettant de différencier le vivant de l'inerte. Il s'agit en somme de pouvoir caractériser ce qui constitue le propre du vivant afin de l'inscrire dans une définition adéquate.

1.3.1 Retour sur les problématiques définitionnelles.

Sur un plan général, sans prendre position par rapport à ce vers quoi elle renvoie, la définition est l'expression énonçant l'équivalence d'un défini et de son définissant. Sous ce rapport, définir c'est donc l'opération qui consiste à déterminer la signification d'une

¹⁶⁷ Cette introduction reprend en partie l'article de Ruiz-Mirazo Keppa, Peretó Juli, Moreno Alvaro. Déjà cité.

expression linguistique (le *definiendum*), le terme à définir, au moyen d'autres expressions linguistiques (le *definiens*) formées à partir de termes et de signes connus. Sur le plan sémantique, la définition vise dans un premier temps, l'accord sur le sens des mots employés dans un contexte d'utilisation qui lui permet d'être interprété sans confusion. Définir, c'est donc tout d'abord une opération de l'esprit qui vise à déterminer la compréhension caractérisant un concept.¹⁶⁸

En logique formelle, il s'agit de l'ensemble des termes connus dont la combinaison détermine le concept à définir et qui est représenté par un terme unique. On renvoie également à Pascal pour qui il s'agissait de «... prouver tout, en substituant mentalement les définitions à la place des définis».¹⁶⁹ Dans la Logique de Port Royal donc, définir c'est un remède à la confusion qui naît dans nos pensées et dans nos discours de la confusion des mots.¹⁷⁰ C'est ainsi que l'on caractérisera la définition nominale.

Hamilton ajoutera deux autres types de définitions.¹⁷¹ A celles qui ne feraient qu'expliquer le sens d'un mot, en énonçant quelques caractères de définition, il ajoute celles qui supposent un concept déjà donné et précédant la définition. Cependant à ce stade, rien n'indique encore que le concept réfère à un objet réel. Par ailleurs la définition par génération considère la définition dans son progrès ou son devenir. Elle explique comment la chose s'est formée à l'exemple de la définition du cylindre comme volume obtenu en faisant tourner un rectangle autour d'un de ses côtés.

¹⁶⁸ Lalande André, *Vocabulaire technique et critique de philosophie*. Presse Universitaire de France : 2006

¹⁶⁹ Pascal Blaise, *De l'autorité en matière philosophique. De l'esprit géométrique ; entretien avec M. de Sacy*. Paris : Félix Alcan Editeur, 1886. Disponible sur Gallica.bnf.fr / Bibliothèque nationale de France.

¹⁷⁰ « De l'esprit géométrique » : « ... Cette véritable méthode, qui formerait les démonstrations dans la plus haute excellence, s'il était possible d'y arriver, consisterait en deux choses principales: l'une, de n'employer aucun terme dont on n'eût auparavant expliqué nettement le sens; l'autre, de n'avancer jamais aucune proposition qu'on ne démontrât par des vérités déjà connues; c'est-à-dire, en un mot, à définir tous les termes et à prouver toutes les propositions. Mais, pour suivre l'ordre même que j'explique, il faut que je déclare ce que j'entends par définition.....On ne reconnaît en géométrie que les seules définitions que les logiciens appellent définitions de nom, c'est-à-dire que les seules impositions de nom aux choses qu'on a clairement désignées en termes parfaitement connus; et je ne parle que de celles-là seulement. Leur utilité et leur usage est d'éclaircir et d'abrégé le discours, en exprimant, par le seul nom qu'on impose, ce qui ne pourrait se dire qu'en plusieurs termes; en sorte néanmoins que le nom imposé demeure dénué de tout autre sens, s'il en a, pour n'avoir plus que celui auquel on le destine uniquement. »

¹⁷¹ Hamilton William. *Lectures on logic: the Doctrine of Division*. London : Blackwood, 1860, vol. II, lecture XXIV, 9-21

Liard¹⁷² distingue également les définitions formelles ou synthétiques et les définitions géométriques qui servent à constituer la matière d'une science et en forment le début. Elles s'opposent aux définitions empiriques qui résument les connaissances acquises inductives (on peut encore parler de définition matérielle analytique ou par composition).

Lalande résumera ces approches en distinguant deux familles d'approches définitionnelles :

D'une part, celle des définitions de concepts donnés d'avance (c'est-à-dire par la connaissance de leur extension) et les définitions des concepts par l'acte même de définition qui conduit aux définitions explicatives et aux définitions constructives.

D'autre part, celle des définitions essentielles et des définitions accidentelles et qui donnent le moyen de reconnaître à quoi elle s'applique.¹⁷³

En logique, en mathématiques il n'existe que des définitions constructives et ces définitions sont alors par nature essentielles. On lie l'existence de l'objet défini à la définition elle-même.

On pourrait encore rajouter une distinction selon le mode de définition. Ainsi une définition par extension énumèrera toutes les choses tombant sous la définition (à l'exemple de la définition d'objet volant par l'énumération de tous les objets dotés de cette propriété) alors que la définition en compréhension sera constituée autour des caractères qui se rapportent à l'objet à définir.

Dans cet ordre d'idée, on dira que la définition explicative rend possible l'assertion en vrai ou faux en relation à l'usage du *definiendum* (la chose à définir) dans une langue donnée.

Enfin, il y a lieu d'évoquer la qualité de la définition. Elle a trait à la concision, la

¹⁷² Liard Louis. *Des définitions géométriques et des définitions empiriques*. Paris : Librairie philosophique de Ladrangé. 1843. Editions VIGDOR, 2002

¹⁷³ Mill J.S., *System of Logic, ratiocinative and inductive*. London : John W. Parker, 1843. Vol.1, chap. VIII §3-4

clarté, la pertinence. Sous cet angle on vise une définition minimale, c'est-à-dire qui recourt au minimum de critères ou de descriptions à énoncer pour différencier un objet (comme le vivant) d'autres objets (inanimés).

Il convient de noter une approche définitionnelle intéressante, celle des définitions polythétiques.¹⁷⁴ Rappelons qu'une espèce polythétique est une espèce définie par un certain nombre de critères, dont aucun n'est nécessaire ou suffisant par lui-même. Il faut noter que dans les démarches de classification, l'approche mono théétique, qui repose sur l'utilisation d'un seul critère, ou d'un seul attribut pour classer une population, s'oppose à l'approche polythétique qui recourt à plusieurs critères ou attributs dans la création des classes ou des subdivisions d'une population. Ainsi en virologie, la définition de l'espèce virale selon Van Regenmortel (1989) conduit à affirmer que « l'espèce virale est un ensemble polythétique de virus qui constitue une lignée de réplication et occupe une niche écologique particulière ».

Cette approche éclaire les définitions de la vie car elle confère une certaine légitimité aux définitions multicritères, définitions listes ou descriptives. On dispose là d'un parallèle évident entre les démarches de classification et les essais de définition de la vie établie à partir de plusieurs critères de différenciation avec les objets non vivants.

Cette revue rapide de quelques approches définitionnelles introduit une distinction qu'il nous paraît utile d'approfondir pour éclairer la suite de notre enquête. Elle concerne l'opposition entre définition des mots et définition des choses. En pratique cette opposition ne peut être aussi radicale que son explicitation le laisserait entendre. En effet, l'exigence de clarté, de concision demeure, même si la définition vise l'essence d'une chose. Il est en effet clair que le *definiens* doit recourir à des termes suffisamment explicites pour que le *definiendum* puisse être précisé sans ambiguïté.

La distinction entre définition comme simple opération linguistique comme la

¹⁷⁴ Littéralement : qui comporte plusieurs thèses.

définition nominale, et définition des choses comme la définition essentielle qui renvoie à une réalité du monde, nous paraît cependant dans notre contexte de réflexion éclairante. Viser une définition réelle du vivant, ce serait avoir pour ambition de caractériser l'objet à définir par une propriété constitutive du monde. Cette ambition semble loin de la pratique quotidienne des sciences de la vie. Le scientifique ne rencontre dans la plupart des cas aucune ambiguïté pour identifier l'objet de ses propositions et analyses. Néanmoins, nous avons vu dans les chapitres précédent que, lors d'exigences scientifiques particulières, exobiologie, origines de la vie..., ses interrogations portant sur ce qui ferait du vivant une entité à part entière parmi le « mobilier du monde », le conduisent *nolens volens* à viser une réalité pour laquelle l'ambition sera de dépasser le côté accidentel de la chose, pour saisir finalement au sein d'une formulation, précise, si possible concise et élégante, sa nature même. Définir ce sera donc également prendre position par rapport à la réalité de l'objet que l'on définit. Essayons de clarifier cette position en passant en revue trois approches philosophiques différentes.

Tout d'abord, dans une tradition que nous ferons débiter par commodité à Aristote, définir c'est élaborer une formule qui énonce l'essence d'un être ou d'une chose et qui en précise la signification. La définition exprime l'essence d'une chose, en genre et différence et est en même temps signification d'un mot par le rapport à ce qu'il désigne. On retrouve donc encore une fois cette distinction entre définition de choses ou réelles et définitions de mots ou nominales.

Mais Aristote va plus loin. La définition est l'énoncé qui traite de la quiddité, ce qui fait qu'une chose est ce qu'elle est. Cette opération intellectuelle exprime donc ce qu'est la chose au-delà même de l'affirmation qu'elle est. La définition déterminera la compréhension essentielle d'un concept, en délimitera l'extension en fixant sa place dans une classification. La méthodologie aristotélicienne (Topiques I) de formulation d'un concept conduit à dégager non seulement ce qu'il a de général mais également ce qui lui appartient nécessairement en propre. On peut ainsi énoncer l'essentiel de l'être signifié par le biais de la division en genre, espèce, individu et cerner la dernière différence atteinte (À titre d'exemple fréquemment cité, la définition de l'homme comme animal raisonnable).

La définition dégage ainsi en propre ce qui est nécessaire, elle énonce la quiddité, l'essence des choses et reliant concept et dénomination, vise à faire coïncider la définition nominale avec l'être même de la chose.

Ainsi, définir le vivant comme chose dotée de vie, ce sera dans cette filiation intellectuelle viser son essence propre parmi l'ensemble des entités participant du mobilier du monde. C'est situer sa différence par rapport aux choses non vivantes constituant le monde inanimé et cette différence est caractérisée par la manifestation d'une « âme ».¹⁷⁵

Chez Leibniz¹⁷⁶ les définitions nominales qui explicitent la signification des mots s'opposent également aux définitions réelles qui définissent l'essence des choses. Le texte ci-dessous est de ce point de vue éclairant :

Il est bon aussi de discerner les définitions nominales et les réelles : j'appelle définition nominale, lorsqu'on peut encore douter si la notion définie est possible.....mais lorsque la propriété réciproque (nota : celle qui sert à la définition) donne à connaître la possibilité de la chose, elle fait la définition réelle ; et tandis qu'on n'a qu'une définition nominale, on ne saurait s'assurer des conséquences qu'on en tire, car, si elle cachait quelque contradiction ou impossibilité, on en pourrait tirer des conclusions opposées.....il y a encore bien de la différence entre les espèces des définitions réelles, car quand la possibilité ne se prouve que par expérience, comme dans la définition du vif argent dont on connaît la possibilité parce qu'on sait qu'un tel corps se trouve effectivement qui est une fluide extrêmement pesant et néanmoins assez volatile, la définition est seulement réelle.

Ici définitions nominale et réelle ne s'opposent pas sur le fond mais sont appelées à se compléter, la définition réelle étant celle qui au-delà d'une expression cohérente pointe vers une réalité (possible) du monde.

S'agissant de vie, des vivants, il reste à introduire une question. Où se situerait cette réalité vers laquelle devrait pointer une définition substantielle? Par là ce dont il s'agit ce serait d'examiner à la lumière de l'ancienne querelle des universaux¹⁷⁷, la conséquence de ce que signifierait pour le concept de vie la contestation de sa réalité en tant que chose abstraite et universelle et l'affirmation que seul l'individu, le singulier est réel. Elle relèguerait la communauté de propriété, c'est-à-dire la vie, à un simple concept de classement, une production de l'esprit humain permettant d'en faciliter la compréhension. Dans cet esprit, c'est le vivant singulier qui est le seul objet réel et les propriétés partagées

¹⁷⁵ Aristote. *De l'Ame*, II, 2, 413ab tr. fr. Tricot, éd. Vrin. Disponible sur philia.online.fr

¹⁷⁶ Leibniz. *Discours de métaphysique*. 1686, §24. Disponible sur : Livres-et-ebooks.fr

¹⁷⁷ d'Ockham Guillaume. *Intuition et abstraction. Si le premier objet connu par l'intellect est le singulier ou l'universel*. Quodlibet 1, question n°13. Paris : Vrin, 2005

avec certains de ses semblables ne sont plus que des commodités permettant de saisir une réalité foisonnante.

Proche de cette position, est celle de Locke¹⁷⁸: « ce que l'on appelle général et universel n'appartient pas à l'existence réelle des choses, mais...c'est un ouvrage de l'entendement, qu'il fait pour son propre usage et qui se rapporte uniquement aux signes... ». Ce qui permet à l'auteur de l'Essai sur l'entendement humain, d'introduire la distinction entre essence nominale et essence réelle. La première concerne le genre et l'espèce d'une chose, la deuxième la constitution intérieure de la chose, réelle et dont dépendent les qualités qu'on y découvre.

Le vivant, dès lors pourrait-il ne recevoir de définition que pour une commodité de l'esprit, afin de subsumer sous une formulation synthétique une communauté de caractéristiques que nous reconnaitrions être ceux d'objets particuliers ? Ce serait donc, la vie, le vivant comme catégorie épistémique et non plus comme catégorie réelle, les vivants dans leur diversité n'étant seulement justiciables que de leur histoire naturelle.

Nous pouvons rapprocher cette remarque de l'affirmation de Michel Foucault¹⁷⁹ :

On veut faire des histoires de la biologie au XVIII^e siècle ; mais on ne se rend pas compte que la biologie n'existait pas et que la découpe du savoir, qui nous est familière depuis plus de cent cinquante ans, ne peut pas valoir pour une période antérieure. Et que si la biologie était inconnue, il y avait à cela une raison bien simple : c'est que la vie elle-même n'existait pas. Il existait seulement des êtres vivants, et qui apparaissaient à travers une grille du savoir constituée par *l'histoire naturelle*.

Ce parcours rapide conduit à caractériser deux préoccupations, deux pôles définitionnels. L'un, que l'on pourrait qualifier de platonicien et qui viserait à saisir dans une définition appropriée le concept de vie comme une réalité intemporelle s'incarnant dans des vivants singuliers, objets de nos perceptions et de nos interrogations. L'autre serait alors celui qui ne conférerait à la vie que le statut d'une commodité de langage permettant de résumer sous une définition commune un ensemble de propriétés à

¹⁷⁸ Locke John. *Essai philosophique concernant l'entendement humain*. Amsterdam, Pierre Mortier Editeur, 1735. Disponible sur : gallica.bnf.fr/bibliothèque_nationale_de_France.

¹⁷⁹ Foucault Michel. *Les Mots et les Choses*. Paris : Tel. Gallimard, 1966, p.139

vocation classificatoire (par exemple vivant/non vivant) ne correspondant pas nécessairement à l'essence réelle de la chose, mais seulement à la manière dont nous, vivant, l'appréhendons.

Il n'y aurait, dès lors, pas de légitimité à viser une réalité dans les essais de définition d'un universel comme « le vivant », « la vie ». Resterait légitime la recherche, à travers l'étude des objets qui en manifestent des caractéristiques si diverses, de ceux qui, participant d'une même famille de propriétés, pourraient être rassemblées sous le terme fédérateur de « vivant ».

Et ces propriétés confèrent alors un « air de famille » à l'ensemble des vivants, air de famille qu'il serait délicat, voire inutile de caractériser sur un plan essentiel mais qui permettrait de grouper sans trop d'arbitraire l'ensemble des êtres vivants sous une même dénomination.

Ce qu'on viserait dès lors, dans une discipline scientifique, ce serait d'articuler la compréhension du mot et son utilisation en tant que nom d'un concept. On se reportera à ce que Wittgenstein avait écrit dans le Cahier bleu et le Cahier brun¹⁸⁰ à propos des jeux de langage, des questions de définition, et de l'introduction d'une différence entre définition ostensive et définition verbale. La première, pragmatique, désigne un objet réel en référence à l'une de ses propriétés, la deuxième énonce à travers une expression ce dont il s'agit. La définition est alors nécessairement tributaire du sens des mots employés, des communautés verbales qui permettent d'en fixer le sens, des pratiques de désignation qui en attestent la maîtrise. Il n'y aurait donc pas de bonne définition mais simplement des définitions qui utilisent des mots « qui ont précisément les sens que nous leur avons donnés ; et nous leur donnons des sens grâce à des explications » (Le Cahier bleu)

Ce que l'on attend alors d'une définition c'est qu'elle soit intelligible dans un contexte de communication partagé qui en fournirait la signification ou l'usage. Car la définition contextuelle ou d'usage opère par abstraction et définit ainsi un concept

¹⁸⁰ Wittgenstein Ludwig. *Le Cahier bleu et le Cahier brun*. Paris : Collection Tel Gallimard, 1996 (trad. française).

susceptible de recevoir plusieurs déterminations nécessitant d'en expliciter le contexte. Ainsi, définir la vie comme système auto-organisé, susceptible d'évolution, peut ne pas viser le même concept selon que l'on réfère au contexte de la chimie, à celui de la vie artificielle « in silico », ou encore à celui de la robotique.

Nous avons présenté dans le chapitre précédent (1.2) des propositions qui participent de ces divers types de définitions. Ainsi la communauté scientifique pratique une approche par extension, incorporant au fil des développements tel ou tel objet d'investigation scientifique dans la catégorie des vivants tout en visant avec difficulté, comme en témoigne la multitude des définitions produites, une définition en compréhension qui en énoncerait les caractères essentiels. Elle recourt à des approches fortement contextualisées selon que la définition emprunte majoritairement ses concepts à telle ou telle discipline.

Appliquées à la vie, quelles pourraient alors être les caractéristiques d'une bonne définition (scientifique) de la vie ? Deux objectifs pourraient être assignés. En premier lieu, elle devrait rendre compte de la spécificité du phénomène vivant, c'est-à-dire le décrire en énumérant un ensemble de propriétés comportant tout ce qui est nécessaire pour le caractériser ; mais elle devrait également rendre compte de la nature fondamentale du phénomène vital. Nous examinerons par la suite (partie III) des approches définitionnelles originales, des définitions modèles (Gánti, Eigen, Addy Pross, Rosen...) qui remplacent les énoncés verbaux, le *definiens*, par des modèles formels rendant explicite les contextes de théorisation retenus, ainsi que les hypothèses de simplification et conventions adoptées.

1.3.2 Définition de la vie : autour du propre des vivants.

Les problèmes évoqués par les multiples tentatives de définition de la vie tournent largement autour des questions abordées. S'agit-il de définitions qui visent la réalité de la chose, l'essence même d'une catégorie naturelle ; s'agit-il de définitions pratiques servant d'outil de communication, et dans ce cas-là, est-on capable de produire des définitions non ambiguës dont les termes même du *definiens* possèderaient eux même une définition dépourvue d'ambiguïté ? Et quels seraient les contextes théoriques qui rendraient de telles définitions valides ?

Par ailleurs on rencontre une vraie difficulté pour rendre compte dans le même

mouvement explicatif de la phénoménalité d'ensembles matériels complexes et de l'organisation matérielle qui les constituent. Sur le fond l'enjeu, s'agissant de définir un objet qui se signale par des différences phénoménologiques manifestes, réside dans nos capacités à en dégager les différences constitutives par rapport aux objets naturels qualifiés de non vivants, ce qui fait au fond qu'une population de bactéries est différente d'une galaxie et qu'une archaebactérie appartient dans cette perspective à la même famille d'objets matériels que *mus musculus*.

C'est donc la nécessité d'articuler deux points de vue différents. Celui des propriétés de la matière qui constitue l'objet à définir, mais également celui qui partirait d'une recension des propriétés phénoménologiques qui lui sont spécifiques. Il s'agit en somme d'unifier au sein d'une même expression les connaissances fondamentales de la biologie, de la chimie, de la physique avec la description minimale d'un phénomène vital comme en étant le nécessaire résultant. Il est alors compréhensible que l'on puisse rencontrer des difficultés pour raccorder ces deux types d'approches. Car l'une, plutôt « *bottom up* » procède de la compréhension de la matière élémentaire constituant le vivant et l'autre, plutôt « *top down* » reste centrée sur ses propriétés globales. Et c'est également le raccordement de deux styles de définitions, l'un plus analytique, l'autre plus phénoménologique.

Même si le schème général d'explication emprunte la voie de la mise en rapport entre l'explicitation des conditions matérielles du système vivant, tant de la nature propre de ses composants élémentaires que de celle de leurs rapports réciproques et les effets qui en découlent, abandonnant en conséquence l'hypothèse même d'une « force » ou principe vital exorbitant des principes régissant l'ensemble des phénomènes naturels, une question épistémologique subsistera. Elle résulte de la coexistence et du recours à des méthodes, des principes, des théories explicatives différentes selon les réalités matérielles formant les diverses strates de l'organisation : les unes d'abord développées pour rendre compte de l'inanimé (chimie minérale et organique, théorie des liaisons chimiques, thermodynamique, sciences de l'informations, cybernétique), les autres élaborées dans le cadre propre des sciences de la vie (génétique des populations, génétique moléculaire, théorie de l'évolution ...)

- ***Passer d'une définition courante à une définition scientifique de la vie***

L'enjeu est donc de passer de définitions courantes, à une définition scientifique

de la vie. Il est clair que cela n'est possible que dans le cadre d'un approfondissement de la connaissance des vivants, d'essais de théorisation (implicites ou explicites) du phénomène vivant.

Le sens commun parle de vie pour parler des phénomènes qui, pour des êtres organisés, s'étendent de la naissance à la mort. Il conduit à une définition de la vie centrée sur les phénomènes vitaux. A titre d'exemple, le dictionnaire Anglo Saxon Webster (1979) définit la vie comme propriété des plantes et des animaux qui leur permet d'absorber la nourriture, d'en tirer de l'énergie, de croître, de s'adapter à l'environnement et se reproduire en tant qu'espèce. La vie est la qualité qui distingue un animal, une plante de la matière inanimée. C'est également la désignation de l'état de possession de cette propriété.

Cette définition renvoie aux idées de durée de vie, d'histoire de l'individu. Elle réfère directement à un sens commun développé autour de l'observation de la vie humaine et des animaux supérieurs. Et c'est par extension, par analogie ou par spécification que cette définition s'est élargie à l'ensemble des espèces vivantes, voire à l'ensemble des phénomènes dans lesquels on observe des caractères semblables ou analogues aux phénomènes de la vie.

L'usage courant du mot « vie » conduit dès lors à confondre et à fusionner la vie comme phénomène et la vie comme principe d'action, nourrissant une autre façon de définir qui fera fond sur l'opposition entre la vie et la mort. Et ces définitions se construisent alors autour de caractères, de phénomènes, en tant qu'ils s'opposent à la mort et renvoient ainsi à une approche de la vie comme principe des phénomènes de vie, comme force d'une nature spéciale qui se manifeste à travers eux.¹⁸¹

Les définitions que l'on peut qualifier de philosophiques visent à définir l'être même de la vie (ou du vivant) et ce à partir de notre être.¹⁸² C'est en effet en partant de cette conscience première que nous saisissons ce qu'est « être vivant ». C'est l'être en vie

¹⁸¹ On retrouve ici, comme un écho aux réflexions de Bichat, Stahl, l'Ethique de Spinoza. Ces approches inscrites dans l'histoire de la pensée de la vie seront examinées dans la partie suivante.

¹⁸² Jeuken Marius, The biological and philosophical definitions of life. *Acta Biotheoretica*, 1975, XXIV (1-2) 14-21

que nous expérimentons. Être et vie sont alors tissés l'un dans l'autre ce qui pose problème à son extrapolation à l'ensemble des vivants. Dans cette perspective, distinguer vie et non vie relève d'une pétition de principe et la vie ressort alors à une notion transcendante. Par ailleurs, elle ouvre la porte aux confusions entre sens courant de la vie et tentatives scientifiques de définition.

Si donc au départ, ce qui compte, ce sont les signes perceptibles de vie permettant de discriminer le vivant du non vivant, on en mesure rapidement les limites. Kant avait noté ce flou :¹⁸³ « Mais des membres de la nature quels sont ceux jusqu'auxquels la vie s'étend et quels sont les degrés de la vie qui confinent à son entière suppression, peut-être sera-t-il possible d'en décider jamais d'une façon certaine ». ¹⁸⁴

Cependant, tenter de retrouver les spécificités de la vie dans l'intimité même de l'organisme conduit à une deuxième série de problèmes.

Dagognet notait :

D'abord, nul ne niera que l'organisme définit un système complexe : on ne peut ni l'analyser simplement (la décomposition ordinaire) ni même procéder sur lui à des manipulations trop aventureuses. Son appréhension suppose l'obligation préalable de recourir à une méthodologie subtile. En effet, si on ne sépare pas ce qui est relié et même fusionné, on ne connaîtra rien des liens ainsi tissés, mais si on les coupe, outre qu'on risque de les dilacérer, on a brisé ce qu'on voulait saisir- les fonctions et les influences réciproques. Comment les savants ont-ils résolu cette vraie " quadrature du cercle"?»¹⁸⁵

Georges Canguilhem apportera les précisions suivantes :

La notion biologique de vie concerne un objet de la connaissance biologique, un donné dont on peut décrire une histoire comprise entre sa vie et sa mort. Elle emporte une série de questions. Qu'est-ce que la vie d'un vivant au-delà de la collection d'attributs propres à résumer l'histoire d'un être mortel. S'agit-il d'une cause et alors pourquoi est-elle limitée dans le temps. S'agit-il d'un effet et alors

¹⁸³ Kant Emmanuel, *Rêves d'un visionnaire*.1776 II. Cité dans Canguilhem : Article « vie », Encyclopédie Universalis.

¹⁸⁴ On notera que pour Kant le concept scientifique dans le contexte du 18^e siècle, sera celui d'organisme, alors que sur un plan métaphysique Kant définit la vie comme la faculté de désirer : « La vie est pour un être, le pouvoir d'agir selon les lois de la faculté de désirer (Ak.V.10). Voir Huneman Ph., *Métaphysique et biologie - Kant et la constitution du concept d'organisme*. Paris : Editions Kimé, 2008

⁷⁷ Dagognet François. *Réflexions épistémologiques sur la vie et le vivant*. Disponible sur Philagora : www.philagora.net.

pourquoi est-il générateur, chez celui des vivants qui s'interroge sur sa nature, de la conscience illusoire d'une force ou d'un pouvoir.¹⁸⁶

Canguilhem notait encore que la connaissance scientifique de la vie se heurtait à un certain nombre d'obstacles. Il y a une contradiction entre l'entreprise de connaissance objective menée par les sciences et leur propre condition de vivant qui est le contraire d'une relation d'indifférence avec le milieu. Elle conduit à une sorte de surdétermination de l'objet biologique comme une vue métaphorique de l'homme. On notera d'ailleurs que de ce point de vue, la théorie de la génération spontanée est le signe d'une survalorisation de la vie, d'une aversion pour la non vie. Elle fait obstacle à une connaissance analytique de la vie.

En partant du besoin reconnu de prendre à bras le corps la définition scientifique de la vie¹⁸⁷ (Voir chapitre 1.1), un certain nombre de questions méritent d'être envisagées. Elles pointent chacune vers des démarches explicatives des phénomènes attribuables aux vivants différentes.

En effet, toutes les sciences parlent-elles de la vie dans un même sens ? Entre la biologie et plus généralement les sciences de la vie qui étudient (principalement mais bien évidemment pas exclusivement) les manifestations des phénomènes vitaux, donc de la vie, par des ensembles matériels organisés et une physique, une chimie qui en étudierait les conditions de formation et de stabilisation relative, nous aurions un jeu disciplinaire qui finalement trouverait ses fondements dans une opposition métaphysique entre la vie comme résultante d'une organisation matérielle déterminée et la vie comme puissance, comme source de causalité autonome. Elaborer une définition qui satisfasse à ces deux attentes ne relèverait-il pas d'une gageure ? Et par ailleurs, la biologie seule est-elle en mesure de proposer un discours unifié autour d'un objet qu'elle n'a pas eu besoin de définir pour se développer ?

Paradoxalement, répondre à la question qu'est-ce que la vie, semble d'abord avoir

¹⁸⁶ Canguilhem Georges, *Encyclopédie Universalis : Dictionnaire de la philosophie*. Albin Michel, 2000

¹⁸⁷ Ouvrage collectif dirigé par Bersini Hugues et Reisse Jacques. *Comment définir la vie ? Introduction*. Paris : Vuibert, 2007

été une question de physicien avant d'être celle de biologistes (Durant la première moitié du 20^e siècle du moins). Par exemple, Erwin Schrödinger a répondu à cette interrogation en mettant en exergue deux propriétés majeures : le « cristal aperiodique » constitué d'une substance héréditaire source de création d'ordre, et la néguentropie permettant au système de ne pas subir le retour vers l'équilibre thermodynamique.¹⁸⁸ Cette intervention de la physique se manifeste également à travers les tentatives d'incorporations au sein de la biologie, de théories qui ont leurs racines dans certaines branches de la physique et de la chimie : théorie de l'information, thermodynamique statistique, structures dissipatives, cybernétique...

Mais le biologiste est intéressé par des entités biologiques concrètes, des « unités taxonomiques opératoires », qui constituent des données d'expérience. Dans cette perspective, il se satisferait donc de la caractérisation de ces entités alors que le physicien serait plus porté aux questions ultimes, fondationnelles. Et la science biologique privilégierait une approche analytique, de « découpage » du vivant qui permet d'en connaître et comprendre les modalités de manifestation des phénomènes vitaux, d'en révéler les mécanismes, multipliant les approches explicatives selon les besoins.¹⁸⁹ La biologie n'étudierait pas la vie mais les propriétés et mécanismes du vivant conduisant progressivement à la disparition de la vie derrière la connaissance renouvelée, analytique, des vivants.¹⁹⁰

La vie serait-elle donc rebelle à toute tentative de définition en raison de sa généralité même, de son côté vague, victime d'une fausse évidence ? La vie n'est que « ce par quoi un vivant vit », disparaissant dans toute étude réductionniste du vivant, s'effaçant derrière les molécules, leurs réseaux d'interactions. Alors faut-il se satisfaire définitivement de la proposition de Bohr de constituer la vie comme un fait élémentaire, l'équivalent en biologie du quantum d'action : « ce qu'il fallait admettre pour pouvoir expliquer le

¹⁸⁸ Cette question a été abordée et traitée du point de vue du physicien par Erwin Schrödinger dans son ouvrage « *What is Life* ». (version française : *Qu'est-ce que la vie ? De la physique à la biologie*. Déjà cité.)

¹⁸⁹ Morange Michel. *Les secrets du vivant*. Déjà cité.

¹⁹⁰ Jacob François, *La logique du vivant*. Déjà cité.

reste » ?¹⁹¹

- *Une question ouverte : où et comment rechercher le propre du vivant ?*

Définir la vie, le vivant c'est au final pouvoir caractériser ce qui fait le propre du vivant, ce qui signe sur le fond sa singularité en tant qu'objet matériel. Il s'agit par-là de quitter le terrain familier des définitions communes pour aller vers une caractérisation de la vie élaborée cohérente avec les attentes des diverses disciplines scientifiques concernées. Ce programme pourrait se construire en partant de la remarque de de Duve¹⁹²: la vie est « ce qui est commun à toutes les formes vivantes connues ». Le propre du vivant procéderait de l'identification du commun de l'ensemble des formes vivantes connues : bactéries, archaé, eucaryotes, voire peut être les grands virus en tant que quatrième domaine. Ce propre tirerait son fondement du constat, renouvelé et documenté par les avancées des sciences de la vie, de l'unité fondamentale du vivant.

Et cette unité se manifeste au niveau de la chimie élémentaire des divers organismes vivants, des composés biologiques élémentaires (acides nucléiques, acides aminés etc.), mais également dans l'organisation répétée de rapports constants et nécessaires qui nouent les relations entre certaines classes de ces composés. Il en est ainsi des rapports enzymes et poly nucléotides, du rôle généralisé dans tout le vivant terrestre de l'ADN et de l'ARN (En excluant, alors et pour cause de ce monde vivant, les virus), à tel point que les vivants concrets, réels n'apparaissent que comme des variations d'un motif général qui, lui serait universel. Elle se manifeste également dans son organisation élémentaire, autour de la cellule mise en évidence au 19^e siècle et dont l'omniprésence a été théorisée par Virchow.

Ce qui est alors en jeu, c'est la capacité à caractériser la nature même de cette association entre unité morphologique et unité chimique, telle qu'elle se vérifie dans le foisonnement du vivant terrestre. Quelle en est la part qui relève de l'universel, quelle en est à contrario celle qui participe d'une forme de contingence, d'accident ? Y répondre

¹⁹¹ Morange Michel, *Histoire de la biologie moléculaire. Le rôle des physiciens*. La Découverte/Poche, 2003

¹⁹² de Duve Christian. *A l'écoute du vivant*. Odile Jacob poches, 2005

c'est aussi d'une certaine façon arriver à briser une circularité épistémologique : l'unité du vivant repose déjà sur une prénotion de ce qu'est la vie permettant d'affirmer que toutes les figures qui en ressortent ont quelque chose de commun, et ce commun participe à la formation de son concept, de son extension, de son sens. (De ce point de vue le triptyque virion, virus, cellule hôte constitue un exemple intéressant des questions posées quant à la notion de vie).

Elle engage donc à questionner la nature de ce « commun »¹⁹³, à viser ce qui est propre au vivant et est au fondement de son unité. Et dans cet ordre d'idée, un des enjeux résidera dans la capacité à caractériser et énoncer ce « propre » en cohérence avec l'ensemble des disciplines concernées.

S'agit-il de le rechercher dans un matériau commun, une organisation commune ? Et alors à quel niveau pertinent de la hiérarchie organisationnelle du vivant faudra-t-il le saisir ? Est-ce au niveau des molécules (essentiellement mais pas uniquement des macromolécules), de celui de la méso organisation, des réseaux d'interrelations entre composés, de celui des organites, de celle de la cellule etc.?

Et ce « commun » n'est-il pas d'abord ou également à rechercher parmi l'ensemble des propriétés communes, propriétés qualifiée de « vitales », qui signent le propre du vivant pour en faire un matériel si différent de l'univers inanimé tel que l'identifie à travers les analyses fines, détaillées, les sciences de la vie dans leur quête du fonctionnement intime des corps vivants ?

- *La recherche du socle de fonctions et de l'organisation matérielle élémentaire propre à l'affirmation du caractère vital.*

Pour caractériser ce qui est « commun à tous les vivants connus », on peut opérer par réduction en établissant la liste des caractéristiques minimales communes que doit posséder l'objet vivant, l'absence d'un item de cette liste permettant alors d'affirmer le caractère non vivant de l'objet.

¹⁹³ Ce souci de dégager le « commun » du vivant structure la démarche de Claude Bernard dans *les leçons sur les Phénomènes de la vie communs aux Animaux et aux Végétaux*. (Déjà cité).

Bien évidemment on part d'une représentation du vivant, comme entité biologique pour en identifier ses caractéristiques. Cela conduit à lister un ensemble de propriétés minimales (fonctionnelles et organisationnelles) que l'on estime indispensables, au regard de principes théoriques, pour qu'une entité puisse être qualifiée de vivante. Rappelons la démarche d'Ernst Mayr¹⁹⁴ et de toutes les définitions listes, paramétriques ou critères.

Le « commun » se situe alors à deux niveaux. Dans la liste elle-même qui *in fine* préfigure les liens de dépendance entre le noyau nécessaire et suffisant de propriétés et celles accessoires ou périphériques. La liste constitue alors une sorte de prise de position implicite sur l'essentiel et l'accessoire, sachant qu'aucune des caractéristiques seules figurant dans la liste n'est à proprement parlé, « propre » au vivant et que ce « propre » réside dans leur union au sein d'un même objet.

Mais ce qui est commun, c'est également l'organisation de la matière. C'est celle qui associe un ensemble de polymères particuliers et spécifiques, poly nucléotides, polypeptides, au sein d'une unité circonscrite par une membrane formée d'une double couche phospholipidique dans laquelle s'insère d'autres polypeptides. Le commun se caractérise alors par la similarité des relations entre ces diverses classes de macromolécules organisées selon des modalités qui leur sont propres et dont les rôles et propriétés ont été révélées et décrites par la biologie moléculaire.

Dans ce commun, une place particulière est conférée à l'ADN, aux acides nucléiques en général. Et si l'ADN n'est pas la vie, sa présence constante (en dehors des virus à ARN), son rôle fondamental dans les mécanismes de réplication interpelle l'observateur : s'agit-il d'un rôle nécessaire (mémoire et réplication) à la manifestation de toute propriété vivante et dans ce cas est-il concevable de définir la vie sans référence à ce polymère et dans quelle mesure ce rôle pourrait-il être assuré par d'autres supports ?

Il faut noter que selon l'étendue de la liste des propriétés minimales, ou des conditions minimales assignables à l'ensemble qualifié de vivant, on confère un poids plus

¹⁹⁴ Mayr Ernst. *Histoire de la biologie. Diversité, évolution et Héritéité*. Fayard, 1989

ou moins important à la chimie du vivant et un rôle essentiel à des composés comme l'eau, l'azote, et plus généralement encore à la chimie du carbone. Et selon l'importance que l'on donne à la présence nécessaire de ces conditions minimales, on force la vie à être liée au substrat chimique du vivant actuel et l'on s'impose une histoire avec un poids de déterminisme conséquent.

La liste de ces propriétés minimales communes s'inscrit également dans une perspective téléonomique. Le vivant élémentaire y est en effet analysé comme un ensemble physique exprimant et réalisant un certain nombre de grandes fonctions élémentaires indispensables à la persistance de son être, telles que métabolisme, réplication, échanges avec l'environnement.

Dans cet ordre d'idée sont alors identifiés les caractéristiques matérielles, ou supports matériels de ces fonctions minimales qualifiant un objet de vivant. Mais c'est en somme un vivant réduit au minimum (un minimum en deçà duquel on ne peut plus parler de vie).

- *La recherche du « commun » dans l'organisation matérielle et dans le jeu des forces internes et externes.*

Dans cette approche on vise à caractériser un mode particulier d'organisation de la matière. Celui-ci se rattache à la vision lamarckienne de « la vie est un ordre et un état de choses ». ¹⁹⁵L'accent est donc mis sur l'organisation de la matière, que l'on tente de saisir à travers la théorie des systèmes complexes. La particularité du vivant sera alors celle de ses structures complexes, de l'organisation leur permettant d'exprimer les propriétés particulières, singulières, esquissées précédemment.

On cherchera également à caractériser ce propre dans des particularités structurales. Ce sera par exemple la mise en exergue du rôle de certaines protéines allostériques (Changeux 2007). ¹⁹⁶Le vivant, sa singularité par rapport à d'autres formes

¹⁹⁵ Lamarck Jean Baptiste, *Philosophie Zoologique*. 1809. Disponible sur : gallica.bnf.fr / Bibliothèque nationale de France.

¹⁹⁶ Changeux Jean-Pierre. *Qu'est-ce que la vie ? Organisation et Régulation*. Dans : Comment définir la vie.

d'organisation de la matière, relèvera alors d'une machinerie, d'une organisation « mécanique », fondée sur des ensembles de réactions nano-macro-chimiques. La singularité se déclinera dans l'organisation résultant du jeu des interactions, du mouvement de formes, d'où le rôle majeur conféré aux protéines allostériques.

Plus généralement, le commun (du vivant) sera recherché sur un plan d'abstraction formel, fourni par un cadre général inspiré par la théorie des systèmes, et conduisant à analyser les systèmes comme un tout plutôt que comme une agrégation de parties.¹⁹⁷

Une première vue, rapide, indique que les éléments et principes qui sous-tendent de tels systèmes mettent en exergue la notion de connexion ou même de coopération dans la constitution d'une unité persistante. Le « commun » est alors identifié à cette capacité spécifique d'assemblages, d'union de sous-systèmes, de coopérations de systèmes moléculaires. C'est le vivant doté d'un « cristal aperiodique » chez Schrödinger, le vivant doté d'un « programme », de « régulation ».

Ce propre du vivant se caractérise également par la capacité à « l'auto production » de son organisation, déclinant ainsi toutes les potentialités d'auto organisation de ses diverses strates matérielles.¹⁹⁸ Ce terme « auto » (soi-même, lui-même) qui fait florès dans les stratégies explicatives de formation de l'organisation vivante au cours de son développement, accompagne certaines des étapes significatives de l'évolution de systèmes matériels. La singularité du vivant est ainsi appréhendée dans sa capacité à se constituer comme un tout sans recourir à une force, une puissance organisatrice qui se situerait en dehors des interactions des composantes, des éléments matériels entrant dans la formation de ce tout. L'organisation procède du jeu d'interactions réactionnelles entre composantes élémentaires, entre composés macromoléculaires, pour se constituer en un ensemble disposant de pouvoirs causaux propres¹⁹⁹ Mais par-là, c'est également sa

Ouvrage collectif dirigé par Hugues Bersini et Jacques Reisse. Paris : Vuibert, 2007

¹⁹⁷ von Bertalanffy Ludwig, *Théorie générale des systèmes*. 1968. Ed. Française 1973 Dunod. En troisième partie nous en examinerons une application réalisée par T. Gánti avec le modèle de l'automate fluide (le Chemoton).

¹⁹⁸ Atlan Henri. *Le vivant post-génomique ou qu'est-ce que l'auto-organisation ?* Paris : Odile Jacob, 2011

¹⁹⁹ Principe d'émergence qui fait des propriétés du « tout » plus qu'un épiphénomène.

singularité en tant que vivant dans l'ensemble du champ de l'auto organisation qui est posé, car *nolens volens* les mécanismes d'auto organisations renvoient au jeu des interactions physico chimiques propres à certaines classes de molécules dans lesquelles des systèmes moléculaires à réplication imparfaite jouent un rôle fondamental. Tout le travail d'investigation hypothético déductif consiste alors à caractériser ce jeu, à proposer le type de relation entre composants élémentaires, parties prenantes de l'ensemble, et à en déduire les conditions environnementales qui induisent cette auto organisation (Par exemple la présence de cycles auto catalytiques). La singularité vivante résiderait ainsi dans une capacité de réplication suffisamment fidèle pour garantir la permanence du système, tout en présentant quelques imperfections, quelques erreurs afin de constituer une sorte de « système darwinien »²⁰⁰ susceptible d'évoluer dans un champ de contraintes sélectives. L'essence de la vie résiderait alors dans la réplication avec erreur et les mécanismes darwiniens agiraient comme une puissance organisatrice.

Mais cette structure vivante doit être, pour des raisons matérielles et énergétiques, ouverte sur l'environnement (nécessité de flux de matières entrant et sortant, maintien d'un état de quasi stationnarité assurant un différentiel d'entropie au détriment de l'environnement). Rendre compte de cette singularité, c'est également savoir arbitrer entre autonomie et hétéronomie, entre la part déterminée par l'environnement et celle liée aux capacités propres du vivant. Cela nécessite d'analyser le jeu réciproque entre principes internes propres et déterminations par le milieu externe dans la constitution de l'organisation vivante. Ce que l'on décrit et théorise ainsi, c'est un système capable d'élaborer de l'ordre à partir du désordre.

Dans cet ordre d'idée, les travaux de Prigogine sur les structures dissipatives, conduisent à saisir le vivant comme structure dissipative particulière, c'est-à-dire comme un système chimique dans un état stationnaire hors équilibre thermodynamique.²⁰¹

C'est en systématisant cette dialectique interne/externe que l'on retrouvera

²⁰⁰ Pour reprendre le vocable employé par Eigen (voir partie 3).

²⁰¹ Prigogine I. et Stenger I. *La Nouvelle Alliance*. Bibliothèque des sciences humaines. Paris : Nrf. Gallimard, 1979. Voir également les premiers travaux de Manfred Eigen (1971) et plus récemment les travaux d'Addy Pross (2012).

l'esquisse de définition de la vie la plus complète, comme «système autopoïétique»,²⁰² comme système capable de synthétiser ses propres composantes en relation avec un environnement lui fournissant matière, énergie, et contraintes d'adaptation.

Aborder le vivant en tant que système matériel, nécessite de mettre l'accent sur sa relation avec l'environnement. Cette donnée fondamentale d'un système ouvert, auto-poïétique, permet bien évidemment d'insérer la structure vivante dans un processus d'évolution comme mode de détermination réflexif de la structure par l'environnement. Cette dimension est prise en compte à travers ce que certains auteurs appellent la « dimension cognitive du système », pour décrire et caractériser un système disposant de degrés de libertés lui permettant d'effectuer des choix à travers un système sensori-perceptif.²⁰³

Dans ces perspectives, la vie résulte alors d'un principe organisateur, d'un principe limitant le hasard. Mais ne côtoie-t-on pas une frontière au-delà de laquelle on basculerait vers une forme de vitalisme?

- *Le commun du vivant à travers une histoire commune.*

Par ailleurs, comment viser une caractérisation qui ne prendrait pas en compte la dimension historique de tout vivant si fondamentale pour expliquer la diversification de la vie et sa généralisation sur le globe terrestre ? Et cette dimension doit-elle être explicitement partie prenante, constitutive de la vie, ou peut-elle être mise entre parenthèses, en pointillé, comme conséquence d'une disposition particulière propre à soumettre le vivant ainsi défini, à la flèche du temps ? L'accentuation du rôle de la durée dans la formation des diversités vivantes aurait comme conséquence que l'unité du vivant, saisie dans ses caractères fondamentaux (matière, organisation, propriétés), ne serait que la conséquence de la dérivation de l'ensemble des espèces vivantes à partir d'un ancêtre

²⁰² Maturana et Varela. *Autopoiesis and cognition*. Dordrecht, Holland Reydel publishing company, 1980

²⁰³ Stenger Isabelle. *Quelles questions poser aux vivants ?* In « Comment définir la vie ». Ouvrage collectif dirigé par Hugues Bersini et Jacques Reisse, 2007

commun, d'une cellule originelle (DACU ou LUCA).²⁰⁴ Mais cela suffirait-il à définir le vivant comme étant tout ce qui dériverait d'un système originel? Ou moins problématique, ce serait inscrire la vie dans un même processus temporel qui s'origine dans une matière non vivante, pré-biotique, porteuse de potentialités multiples et diverses : systèmes matériels auto-répliquant, systèmes matériels transformant de l'énergie pour se maintenir, systèmes matériels métastables échangeant avec l'environnement, inscrits dans une flèche temporelle convergeant vers la vie « telle que nous la connaissons »

La durée serait soit un paramètre externe agissant via une pression de sélection, ou un paramètre interne rendant possible la constitution d'un ensemble stabilisé.

Ce questionnement est bien évidemment renouvelé avec l'extension des champs scientifiques qui reposent la question des frontières entre vivant et non vivant : origine de la vie, exobiologie, vie artificielle y compris dans sa version la plus radicale visant la création d'une vraie vie « in silico », perspectives ouvertes par les avancées de l'informatique et des sciences de la complexité, mais également avec les développements attendus autour des produits du génie génétique et de l'interpénétration de ces différentes techniques.

- *Le commun du vivant à travers la reconnaissance et la constitution de frontières ? : entre vie et non vie, entre vie artificielle et vie naturelle, entre vie terrestre et vie ailleurs ?...*

Les approches précédentes peuvent être revues à la lumière de la recherche de critères de délimitation, de distinction, de différenciation, caractérisant la frontière séparant vivants et non vivants. C'est d'ailleurs cette démarche : la recherche d'un critère de tri, qui vraisemblablement a été au fondement des définitions de la vie.

Et cette séparation peut être envisagée sur un plan « diachronique », procédant de la mise en perspective historique induite par les réflexions sur la genèse du vivant. Elle peut également être étudiée sur un plan « synchrone » lorsqu'on questionne nos capacités

²⁰⁴ DACU ou Dernier Ancêtre Commun Universel et l'acronyme anglo-saxon, LUCA : Last Universel Common Ancestor.

à identifier une forme de vie extraterrestre qui pourrait avoir émergé ailleurs que dans notre système solaire. Cette recherche englobe par principe tout notre univers et attesterait en cas de succès, de l'universalité de la vie, pour autant que des conditions physiques propices à son émergence soient réunies.

Le commun intégré dans une définition du vivant englobant toutes les formes de vie terrestre et extraterrestre devrait alors être suffisamment général pour ne pas décalquer à l'identique la chimie du vivant terrestre tout en présentant bien évidemment des caractères identiques et proches de celui qui sert à caractériser le vivant « tel qu'on le connaît ».

Ainsi la définition : « la vie est un système chimique auto entretenu disposant de la capacité à s'engager dans une évolution darwinienne »²⁰⁵ pourrait répondre à ce critère, constituant à la fois le commun de la vie terrestre et livrant un critère de différenciation de ce que serait des systèmes non vivants, tout en ne l'enfermant pas dans une description reproduisant la chimie du vivant terrestre.

Dans le même ordre d'idée, les réflexions sur la vie artificielle paraissent de nature à réinterroger l'essence de la vie naturelle. Ce sont par exemple les programmes exploitant les potentialités de la plate-forme logicielle *AVIDA* élaborée par Ofria, Adami, Brown, à l'université californienne « Caltech », afin de créer et faire « vivre » des organismes virtuels, ou encore le programme *Tierra* conçu par Th.S.Ray en 1990.^{206,207} La vie artificielle permet en effet de reposer à nouveaux frais la question des frontières séparant les « vies » de différentes natures, les différenciant ou les rapprochant dans une forme commune.

Dès lors il apparaît que la recherche du commun des entités vivantes se décline selon plusieurs axes d'interrogation : celui de leur composition matérielle, celui de leur organisation, de leur structuration et celui des propriétés exhibées. L'enjeu est de saisir ce

²⁰⁵ Traduction de : « *Life is a selfsustained chemical system capable of undergoing Darwinian evolution* » (NASA, Joyce, 1994)

²⁰⁶ Adami C., *Introduction to artificial life*. New York : Springer-Verlag, 1998. Voir également: <http://avida.devosoft.org/>

²⁰⁷ <http://life.ou.edu/tierra/>

qui dans une composition matérielle donnée emporte comme conséquence nécessaire une classe d'organisation spécifique porteuse de propriétés vitales, et en quoi une organisation élémentaire rencontrée universellement sur Terre semble être la condition nécessaire à l'expression des potentialités inscrites dans la nature chimique et les caractéristiques de ses composants élémentaires.

C'est également la question de la nécessité de l'isolement relatif d'une entité vivante par rapport à un milieu avec lequel elle échange tout en maintenant son intégrité, afin que les composantes de l'ensemble puissent pleinement exprimer leur potentialité.

Mais pour autant doit-on céder à la tentation d'identifier la vie à ces différents principes d'unification ? Car finalement, ce que suggère également cet aperçu sur le commun du vivant, c'est que si l'unité des vivants s'affirme sur au moins trois plans : celui de sa composition matérielle, celui de son organisation et celui de son fonctionnement ; ce qui est en jeu au fond c'est leur lien, sans que l'on puisse toujours et systématiquement en articuler les deux derniers à partir du premier qui serait plus fondamental.

Un des enjeux en matière de théorisation du vivant, de sa définition en tant qu'entité matérielle singulière serait alors de pouvoir rendre compte de ce qui noue, ou met en relation nécessaire ces différents plans, dont l'union est ce qui constitue le fond même de l'unité des vivants.

Peut-on finalement viser une définition universelle du vivant (et de la vie) sans tenir compte des enjeux heuristiques ? Différents buts peuvent en effet être assignés aux définitions de la vie : pragmatique pour faciliter l'intercompréhension des enjeux théoriques liés à la compréhension du phénomène vital, opératoire permettant d'établir des critères de différenciation entre animé et inanimé, univocité et acceptation par toutes les disciplines scientifiques, universalisme énonçant un principe de vie susceptible d'être décliné dans des environnements physico-chimiques différents de ceux rencontrés sur terre.

Le schéma général d'élaboration d'une telle définition pourrait être le suivant : la vie est la manifestation de systèmes matériels spécifiques relevant de principes résumant les conditions nécessaires et suffisantes qui font d'un ensemble matériel un système exprimant des manifestations phénoménales qualifiables de vitales (dans ses déclinaisons les plus fondamentales). Deux positions contrastées s'offrent alors à nous : d'une part les

contraintes portant sur les conditions nécessaires et suffisantes de formation de tels systèmes matériels sont telles qu'une probabilité raisonnable de les rencontrer dans l'univers est envisageable, ou d'autre part ces conditions sont telles que la transformation en système vivant d'un ensemble matériel qui satisfasse à ces conditions relève de l'accident heureux.

Et dans ces perspectives il y aurait donc place pour toute une gradation et toutes les combinaisons d'approches selon les contextes théoriques utilisés. Ce serait alors la maîtrise de ces approches multiformes qui rendrait possible le passage de la connaissance du vivant à sa compréhension, c'est-à-dire qui permettrait de passer d'une description sans cesse affinée à une compréhension de ce qui constitue le propre du vivant, source d'une définition qui ne serait plus la liste de principes et propriétés actualisées mais exprimant sa singularité sur un plan fondamental.

Il reste donc nécessaire de définir un concept de vie qui puisse unifier les différents aspects des sciences de la vie : un modèle unificateur des différentes disciplines biologiques.

On vise alors une définition constitutive de la vie en en assumant un corollaire possible, celui de traiter les êtres vivants comme l'instance d'un principe théorique spécifique, un principe de vie, qui réactualiserait une forme de vitalisme.

S'il fallait dresser le cahier des charges de la bonne définition de la vie, on énoncerait les conditions suivantes : livrer une condition nécessaire et suffisante du terme à définir, être universelle, donc applicable sans ambiguïté au passé, au présent, ici et ailleurs, capter l'essence même du terme et permettre de statuer sur les cas ambigus.

Finalement ce qu'on voudra à travers une définition de la vie, c'est rendre compte de la persistance de structures, la raison et le mécanisme qui l'expliquerait. Ce serait pouvoir répondre au pourquoi et au comment telle chose est vivante, ce qui nécessite en conséquence de situer l'explication au carrefour de deux exigences : la vie comme résultat de l'évolution d'une structure matérielle et la vie comme permanence. La définition sera le détour qui procéderait de ces explications.

Mais, s'agira-t-il de définir la vie ou le vivant, la propriété vitale ou l'objet matériel support de ces propriétés : d'une part la vie comme conséquence d'une disposition particulière de la matière, et d'autre part les phénomènes vivants au cœur de notre

reconnaissance d'objets qualifiés à travers ces manifestations, d'organismes vivants, d'êtres vivants, de systèmes vivants ?

Une des difficultés réside dans le fait que le phénomène vital ne se donne pas comme une propriété compacte comme le laisserait croire une formulation binaire opposant vie et non vie. Il apparaît plutôt comme un ensemble de manifestations multiformes de propriétés et caractéristiques regroupées, subsumées sous le concept de vie. Et de plus, comme une grande partie des manifestations vitales (par exemple la reproduction, l'évolution) se manifeste à travers un réseau complexe d'interrelations non seulement intra individuelles mais également inter individuelles, est-il vraiment pertinent d'attribuer cette propriété vitale à un objet singulier, individualisé, séparable de la population dans laquelle elle s'exprime ?

- ***Questions corrélatives à la définition de la vie comme propriété d'une organisation matérielle singulière***

- *Principes de vie et « incarnation matérielle ».*

L'organisation vivante est caractérisée par une relation intime, étroite, entre matière et forme. Viser l'universalité de la propriété vitale conduit dès lors à penser la vie dans un faisceau de contraintes à l'image de la vie terrestre. S'inscrivant dans une sorte de principe anthropique faible²⁰⁸ on est alors conduit à rechercher la vie dans l'univers comme réalisation d'un principe (organisation d'une certaine matière) identique à celui rencontré sur terre.

Les descriptions, les critères de vie sont déduits de la connaissance de la vie rencontrée sur terre (et pour cause...), constituant une sorte de contrainte épistémologique orientant les démarches d'investigations. C'est par exemple l'assertion de la présence d'eau comme condition nécessaire à la vie, ou celle de l'existence de propriétés particulières de polymères issus de la chimie du carbone etc.

²⁰⁸ Que l'on peut résumer ainsi : « la physique énonce des concepts coordonnés, cohérents entre eux et cohérents avec l'existence du monde et avec notre existence au sein du monde ». Critique de ce concept par : Bot Ludovic, *Philosophie des sciences de la matière* ; page 280. Paris : L'Harmattan, 2007

Cette question met en perspective les interrogations portant sur le degré de connexion de la vie avec les supports matériels, biologiques, caractéristiques de la vie terrestre. S'agissant de vie, veut-on parler d'un principe qui s'incarnerait dans des types de structures moléculaires ? Pourrait-on alors concevoir la vie comme un principe qui s'incarnerait dans une réalité pouvant recevoir des déterminations matérielles variables ? On recourrait alors à des définitions de la vie à connotation platonicienne, définitions de vie désincarnée, sans rapport direct avec une matière, ce serait l'idée de vie ou d'un principe de vie qui existerait sans nécessairement devoir être actualisé.

A l'opposé, la vie, le « principe vital » serait immanent à une réalité matérielle donnée, à une organisation spécifique de la matière qu'il s'agirait de caractériser sur un plan fondamental. Ce serait un type particulier d'organisation, une nouvelle classe d'organisation de la matière qui pourrait être rencontrée au sein d'une gamme de contraintes matérielles, d'énergies etc. dont l'étendue resterait à explorer, et au sein de laquelle seules pourraient exister des configurations matérielles organisées de telle sorte qu'elles exhibent des propriétés vitales qui participent de celles du « vivant tel que nous le connaissons ». Cette approche conduit à imposer une matérialité particulière aux phénomènes vivants, proche de celle rencontrée sur terre.

Finalement les définitions et caractérisations de la vie oscillent entre une approche transcendantale mobilisant une cause extérieure à sa manifestation (la vie dérivée) et une approche immanente.

- *Temporalités du vivant et de la matière : comment prendre en compte la durée ?*

Définir le vivant actuel peut se faire in abstracto de la perspective évolutionnaire. Mais il s'agira d'une définition limitée. Elle ne ferait que caractériser en quoi une chose est vivante, et en quoi elle diffère d'une chose matérielle inanimée. Mais limité à cet angle d'interrogation, un pan essentiel de la réalité vivante est comme mise entre parenthèse.²⁰⁹

²⁰⁹ On rejoint la conclusion d'un article de Tirard, Morange et Lazcano : « la question que nous devons traiter quand on interroge la nature de la vie n'est plus « quelles sont les caractéristiques des organismes qui ne se retrouvent pas dans les objets inanimés », mais « comment ces caractéristiques ont été progressivement

Une autre approche doit être envisagée afin de pouvoir répondre à la question comment une telle structure matérielle est arrivée à l'être, comment elle est devenue ou a pu être qualifiée de vivante dans un processus évolutif. Cette question relevait dans le passé d'un questionnement moins scientifique que métaphysique. Elle trouve maintenant une place naturelle dans les démarches scientifiques notamment à travers les interrogations sur les origines de la vie. Et c'est sous cet angle d'approche qu'il est nécessaire d'incorporer la perspective évolutionnaire dans la définition de la vie.

Il s'agit d'une certaine manière de fonder, dans ce qui constituerait le propre du vivant, la distinction effectuée par Ernst Mayr²¹⁰ entre causes proximales et ultimes en biologie. Et ce qui est en jeu, c'est le rôle et la place conférés à la durée, au temps dans la constitution du propre du vivant.

Dans le cadre d'une définition du vivant, ce rôle peut rester au second plan dès lors que l'on ne vise qu'une caractérisation anhistorique du vivant. Dans une sorte de mise entre parenthèses de la perspective historique, on ne viserait que ce qui constituerait un vivant sur le fond en transcendant ses multiples réalisations concrètes qui s'inscrivent dans la durée. Mais si on réintègre alors cette perspective temporelle, par exemple dans les problématiques d'émergence des différentes formes vivantes, quelle place faut-il alors accorder au processus évolutif dans la caractérisation du vivant?

Doit-elle être constitutive du vivant dans le sens où, sans potentiel d'évolution il ne pourrait y avoir de vie ? Ce potentiel d'évolution serait dès l'origine inscrit dans les mécanismes même qui rendent possible la constitution du système matériel qualifié de vivant. Ou à l'inverse, ne faut-il pas traiter les processus évolutifs comme procédant d'accidents auxquels le vivant doit faire face ? C'est dire alors que dans ce cas l'évolution ne serait qu'une résultante, celle de la confrontation d'une certaine disposition de la matière, d'une configuration particulière, subissant une pression de sélection qui conduirait le vivant, en somme à son corps défendant, à évoluer. Alors qu'à l'inverse une

associées au sein de ces objets que nous appelons organismes ». Tirard Stéphane, Morange Michel, Lazcano Antonio. The definition of Life : A brief History of an Elusive Scientific Endeavor. *Astrobiology*, 2010, vol 10: 1003-1008

²¹⁰ Mayr Ernst. Cause and effect in biology. *Sciences, New series*, 1961, Vol 134: pp. 1501-1506

autre approche conduirait à caractériser le vivant en intégrant dans le noyau même des propriétés caractéristiques d'une organisation matérielle coopérative, sa capacité à évoluer en tant que « système darwinien » (Pour reprendre la formulation d' Eigen en 1971), rendant d'ailleurs possible par là même l'inscription de l'émergence de la vie dans un processus temporel commun à celui de l'évolution de la matière vers l'organisation intégrée constitutive du système vivant minimal et ensuite son évolution ultérieure vers la « vie telle que nous la connaissons ». De ce point de vue, la théorisation d'une stabilité dynamique de systèmes réplicatifs chimiques avec le concept de D.K.S (*Dynamic Kinetic Stability*) développé par le bio chimiste Addy Pross en constitue d'ailleurs la traduction en terme de mécanisme chimique et permet de proposer une définition de la vie comme « un système autonome de réactions stabilisées dynamiquement et dérivant de réactions de réplifications ».²¹¹

Dans l'étude des origines de la vie, deux aspects méritent d'être distingués. C'est, d'une part celui de l'origine de la vie telle que nous la connaissons, celle qui est au cœur des sciences de la vie, qui conduit à imaginer ou à inventer (induire, inférer) un processus, qui partant d'une organisation vivante minimale, décrirait un chemin possible vers la vie actuelle. (Une histoire compatible avec ce dont on dispose comme documents sur le passé du vivant, cette paléographie de la vie). On aurait alors une définition du vivant qui s'élaborerait autour du « DACU » (ou LUCA),²¹² définition d'une cellule originelle, point de départ virtuel de notre histoire du vivant. Mais d'autre part, partant de conditions dites pré biotiques, ce serait également imaginer, concevoir etc. un processus conduisant la transition d'une matière qualifiée d'inanimée vers un état dans lequel existerait une structure matérielle, une structure minimale rendant possible l'incorporation progressive, ou par saut qualitatif, de propriétés que l'on subsume sous le terme de vie. On disposerait alors d'une définition qui se construirait autour de propriétés dynamiques de la matière.

Donc deux approches, l'une descendante partant de la vie actuelle, l'autre remontante partant des limbes de notre histoire terrestre. Le raccordement de ces deux

²¹¹ Pross Addy : *What is life*, déjà cité.

²¹² Pour « Dernier Ancêtre Commun Universel » et « Last Universal Common Ancestor ».

démarches semble assez exigeant sur le plan épistémologique. On se donne comme contrainte non seulement de faire apparaître une structure matérielle dotée de propriétés remarquables, mais également de la faire évoluer selon des séquences nécessaires. En tout état de cause cela conduit à imaginer des uchronies qui permettent de construire une histoire vraisemblable. Chaque étape d'évolution du vivant lui permet de se créer des degrés de libertés supplémentaires. Ce serait alors une logique de l'occasion que le vivant développerait, c'est-à-dire une capacité à se saisir des opportunités, à transformer et exploiter la contingence. Le vivant deviendrait un sujet d'occasions, (Stenger 2007) inscrit dans une histoire, une durée. Et là encore on renvoie à une définition du vivant comme système doté d'une capacité à exploiter les opportunités offertes ou imposées par la Nature.

Ne faut-il pas alors juste raconter le vivant (son histoire) au lieu de tenter d'en caractériser l'essence²¹³ que l'on souhaitait capter dans sa définition? Et le vivant resterait alors sur le fond, non définissable.

On notera cependant que le temps long, celui de l'histoire du vivant croise nécessairement celui, court, de l'espace temporel menant de sa naissance à sa mort. L'ontogenèse est connectée à la phylogenèse à travers les mécanismes de reproduction, de variation, d'hérédité. Et la succession sans fin d'individus qui se reproduisent par filiations nécessaires et variations aléatoires, conduit sous l'effet de la pression de sélection à la constitution d'arborescences du vivant explorant toutes les possibilités de vie offertes par l'environnement terrestre.

Cette rencontre de la nécessité et du hasard autour d'un individu préside à sa propre constitution. C'est ainsi que l'ontogenèse peut être analysée à travers un paradigme stochastique.²¹⁴ Deux séries temporelles, celle du développement et celle de la phylogenèse, se conjuguent à travers un mécanisme unique de sélection darwinienne. Celle-ci agit au niveau des phénotypes, des organismes, pour sélectionner les traits qui assurent une meilleure « valeur sélective » (*fitness*) et agit d'autre part au niveau moléculaire en

²¹³ Morange Michel, *La vie, l'évolution et l'histoire*. Odile Jacob Sciences, 2011

²¹⁴ Kupiec Jean-Jacques. *L'origine des individus*. Paris : Fayard, Le temps des sciences, Paris, 2008

sélectionnant les structures qui s'intègrent le mieux dans l'architecture générale de l'organisme. C'est en somme la mise en adéquation temporelle de deux niveaux de contraintes. C'est l'état macroscopique (sélectionné globalement) qui détermine les spécificités des interactions moléculaires au niveau moléculaire.

▪ *Continuité, discontinuité et définition minimale de la vie.*

Dans la perspective ouverte par les investigations sur l'origine de la vie, on recourt à des définitions se proposant de caractériser la structure élémentaire de vie. Celle-ci constitue alors le support d'une heuristique destinée à explorer les voies de passage de l'inanimé à l'animé. Ce concept de vie minimale s'élabore autour de quelques-unes des caractéristiques phénoménologiques les plus centrales du vivant, sous tendues par une propriété essentielle. L'ensemble de ces caractéristiques permettrait alors de situer un moment dans l'évolution d'un système chimique, d'un système matériel, vers une vie primitive, de marquer le passage du pré biotique au biologique. Cette approche permet de dépasser l'anomie portée par les définitions listes pour rassembler dans une formulation raccourcie les fondements même de la vie.

Plus généralement la recherche d'une caractérisation minimale de la vie se nourrit de toute une série de préoccupations ouvertes par les nouveaux champs d'investigations du vivant : origines de la vie comme marqueur d'un changement qualitatif, quêtes de systèmes biotiques exotiques comme heuristique de recherche, synthèses de systèmes artificiels vivants comme défis lancés aux critères de vie ...

On retrouve des approches convergentes pour caractériser le système vivant élémentaire. Luisi (1998) définit ce système minimal comme devant être : homéostatique et autonome, capable d'utiliser de l'énergie libre, cantonné au sein d'un volume défini par une membrane semi-perméable, et capable de produire lui-même les composants propres de son système de production.

Bedau (1996) ²¹⁵développe cette approche en l'élargissant à la caractérisation de

²¹⁵ Bedau Mark A., *The nature of life*. Published in Margaret Boden: *The Philosophy of Artificial Life*. Oxford

l'essence de la vie comme capacité d'« adaptation souple ». Celle-ci se constitue par le jeu de trois fonctions fondamentales abstraites de leurs détails chimiques et constituant fonctionnellement le noyau de la cellule minimale. Il s'agit des fonctions critiques suivantes :

- celle du maintien de l'identité du système vivant tout au long de l'existence ;
- celle qui assure l'extraction et l'utilisation d'énergie libre à partir de l'environnement ;
- et enfin celle de contrôle au moyen d'un support informationnel héritable et modifiable au cours de la reproduction.

Ces fonctions s'incarnent dans trois systèmes chimiques : un système métabolique, un système génétique et un système membranaire.

C'est cette triade fonctionnelle qui caractérise la (ou une) vision minimale de la vie. On notera cependant que ces fonctions doivent être couplées, se soutenir mutuellement, car c'est le système dans son entier qui rend possible l'expression de chaque fonction, chaque sous-système devant assurer à la fois ses propres opérations et le support aux deux autres sous-systèmes, constituant ainsi une totalité intégrée rendant possible le fonctionnement du tout.

Les autres fonctions identifiables dans le vivant actuel, fruit d'une évolution complexe, sont dès lors dérivées de cette triade élémentaire intégrée. Il en est ainsi par exemple du traitement autonome de l'information, de la sensibilité à l'environnement.

C'est à partir de ce concept de vie minimale, de l'unité organisationnelle minimale, que Bedau introduit l'essence de la vie comme évolution sans limitation.²¹⁶ Dans cet ordre d'idée, la triade constitue la « solution organisée » rendant possible l'expression de cette essence. Notons cependant que pour que le processus évolutif puisse se mettre en place, il

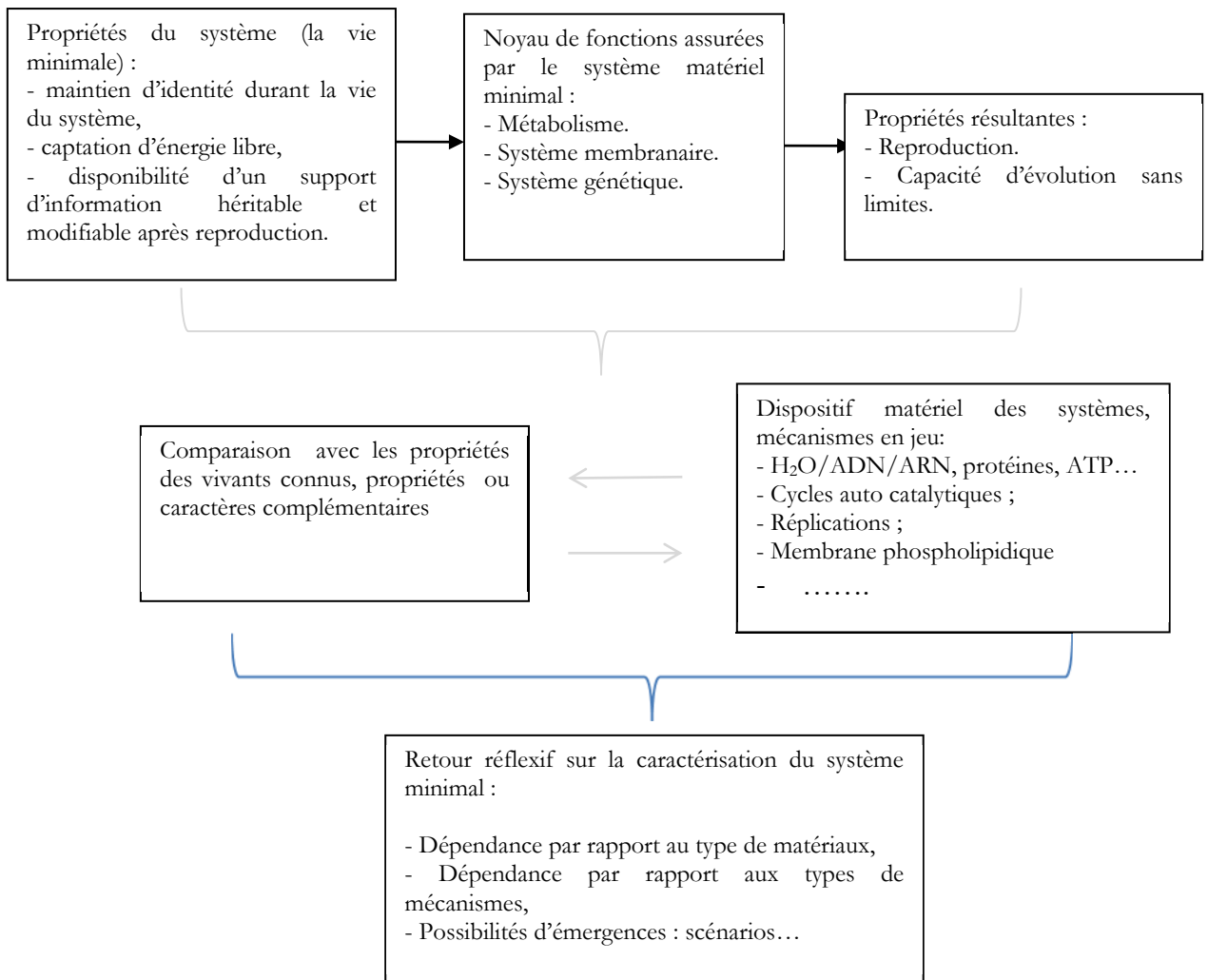
University Press:1996, pp. 332-357

²¹⁶ Maynard Smith J., *The Theory of Evolution*, 3rd edition, New York: Penguin,1975

est nécessaire que l'héritage informationnel ne soit ni trop parfait ni trop infidèle. Le concept d'évolution sans limite, comme essence de la vie, déporte la problématique essentialiste de l'organisation matérielle vers celle d'une dynamique, d'un potentiel d'évolution. Il autorise la synthèse de deux positions contrastées : la nécessité exprimée par une contrainte (celle du fonctionnement de trois sous-systèmes unis) et la contingence (le hasard répliatif). Cette rencontre constitue dans une dynamique unitaire, et la permanence de l'identité de l'ensemble matériel, et sa capacité à évoluer.

Le noyau ultime de la vie réside alors dans l'union de trois propriétés, comme l'identité, la capacité à utiliser de l'énergie libre, la présence d'un support informationnel héréditaire. Toutes ces propriétés doivent être couplées, associées afin de former le tout indissociable de l'être vivant et constituer le propre d'une entité vivante. Cette association, dont l'identification est fruit d'une abstraction partant du vivant réel connu, devra être réalisable en tant que totalité dans un contexte matériel donné. C'est d'abord celui de la chimie terrestre (actuelle et passée), mais aussi, peut-être, celui d'autres systèmes stellaires, voire même celui d'environnements artificiels. Elle devra également rendre possible la manifestation, au cours de l'évolution temporelle, d'autres fonctions. Et c'est cette «matérialité » qui rendra alors possible l'expression d'une essence propre au vivant, celle d'une évolution sans limites. (Bedau, 2008)

La démarche de conceptualisation de la vie minimale pourrait être schématisée de la manière suivante :



Concevoir une vie minimale

Il existe bien évidemment un degré d'arbitraire dans la caractérisation du système vivant minimal que l'on essaye de limiter par une démarche réflexive mobilisant les connaissances du vivant actuel, de sa chimie et de scénarios d'émergences mettant en jeu des systèmes matériels connus. Dans une perspective d'élargissement de la vie vers d'autres environnements matériels, ce degré d'arbitraire peut introduire à l'idée de plage matérielle permettant de réaliser un système vivant minimal avec un type de matière différente.

Cette problématique débouche sur une interrogation fondamentale. La transition vers la vie s'inscrit-elle dans un mouvement continu fait d'une succession d'évènements matériels, fruits d'une part aléatoire et d'une part de détermination ? Cela inscrirait la vie dans un processus progressif d'évolution dont l'une des étapes correspondant au concept de vie minimale signerait un changement qualitatif. On aurait alors identifié dans une

évolution temporelle, dans un contexte et un environnement propice, une structure matérielle particulière, singulière, qui de par son organisation manifesterait un saut qualitatif, une sorte de changement d'état de la matière, permettant de la qualifier comme une réalité nouvelle, comme un objet doté de vie. On associerait ainsi une forme de progressivité, celle de ou des trajectoires par lesquelles l'évolution de la matière s'inscrirait dans un continuum marqué par un changement, un saut qualitatif correspondant à la formation d'un système unifiant les composantes majeures du système vivant minimal. De ce point de vue le concept de vie minimal est ce qui permet de penser cette évolution dans un cadre temporel et matériel cohérent avec les données de la géologie terrestre, de sa physico chimie, et de permettre son élargissement à d'autres environnements matériels.

Les conditions de possibilité de réalisation de la vie sur terre (ou éventuellement ailleurs) impliquent l'inscription de la vie comme propriété d'un système matériel dans une perspective historique. Dans cette perspective on tente de théoriser la transition entre un état du monde dans lequel les atomes et molécules seuls seraient organisés pour rendre possible son développement vers celui relevant de la chimie du carbone, d'abord dépourvu d'organisation stable, évoluant ensuite vers un état du monde dans lequel se seraient développées les structures matérielles que nous qualifions de vivantes.

Mais cela conduit à deux façons de penser l'évolution. D'abord comme continuité, celle de la matière fondamentale, celle des « lois de la nature », toile de fond d'une évolution graduelle vers des organisations de plus en plus complexes. Et dans cette perspective c'est alors la distinction qui semblait fondamentale pour tous, le vivant comme opposé au non vivant, qui s'estompe ou qui relève d'un arbitraire : ne serait vivante que la structure matérielle que l'on décide de désigner comme telle. Et à l'inverse, cette évolution est également nécessairement pensée comme une succession d'étapes marquées par des ruptures, dont l'une, essentielle serait le moment d'une transition dont la caractérisation permettrait de séparer nettement un avant sans vie d'un après ouvert sur l'histoire et le règne du vivant.

Dans une approche strictement continuiste, il faudrait néanmoins pouvoir décrire (ou raconter) les conditions physiques et chimiques qui permettent à une certaine configuration matérielle d'émerger puis d'évoluer continument vers un système proche de la vie telle que nous la connaissons. Ces spécifications porteraient à la fois sur les conditions physiques, chimiques, thermodynamiques d'un environnement propice, facilitant l'émergence d'une telle configuration et celui de l'organisation matérielle

susceptible d'évoluer vers ce qu'on appelle la « vie telle que nous la connaissons ».²¹⁷ Mais, même dans ce cadre général, on ne pourra exclure des changements qualitatifs, des accélérations des choses comme ce qui se rencontre dans les transitions de phase de matériaux plus simples : transition de l'amorphe au cristal, transition vitreuse du passage d'un état viscoélastique à un état vitreux, du liquide au solide etc.

Et cette capacité à associer rupture et continuité est donc étroitement liée à la façon de définir le propre de la vie : fonctions propres, organisation propre, une ou des propriétés propres, voire un matériau propre.

Les caractéristiques minimales peuvent être définies sur un plan plus abstrait par l'identification d'un principe organisateur comme par exemple celui de l'auto organisation théorisant l'association, le couplage, la constitution de réseaux par le jeu des interactions entre composants de la matière. On sortirait alors du dilemme continuité et rupture pour penser une évolution non-vie vers la vie, progressive et marquée par des changements qualitatifs.

- *Autonomie et individuation*

La traduction de la définition proposée par Joyce (1994) reprise par la NASA en « ...système chimique autonome capable d'évolution darwinienne » met en exergue l'oxymore caractérisant une tension entre une détermination externe, l'évolution darwinienne d'une part et une capacité interne d'autre part, support de l'autonomie du vivant le dotant d'un pouvoir causal propre.

Par autonomie, en opposition à hétéronomie, on énonce le fait de ne pas être dépendant de lois extérieures. Rappelons que l'autonomie en droit (politique) signifie la capacité à définir ses propres normes de fonctionnement, à s'administrer librement dans le cadre d'une tutelle politique exercée par un Etat central. Elle n'est pas synonyme de souveraineté, d'indépendance qui restent des attributs de l'échelon étatique.

²¹⁷ Maynard Smith ; Szathmary Eörs, *The major transitions in evolution*. Oxford University Press : 2007

Associer ce terme à l'évolution darwinienne, comprise comme évolution résultant de la sélection au sein d'une population d'individus disposant par le jeu du hasard d'une meilleure valeur sélective (fitness relative), induit alors un problème pour penser l'autonomie de l'individu biologique.

Cette tension, mise en scène par la définition de la vie proposée par Joyce, introduit un jeu entre des déterminations externes au système vivant et ses déterminations internes, jeu au fondement du processus d'individuation. Et sous cet angle, l'être vivant n'existe que par une relation de confrontation à l'environnement. C'est d'un côté l'autonomie comme manifestation de la constance dans son être, et de l'autre une pleine insertion dans le milieu environnant dans une relation d'interdépendance.

Quel sens peut-on alors donner au concept d'autonomie du vivant ? Il renvoie à une caractéristique de l'individu biologique comme disposant d'une capacité (ou d'un potentiel) à développer ses moyens propres d'action au sein d'un environnement qui le contraint. Mais en recourant au concept d'autonomie, l'enjeu est de pouvoir spécifier ce qui pour un système matériel qualifié de vivant diffère fondamentalement d'autres systèmes matériels résultant également d'une contrainte : cellules de Bénard, flammes de bougies, réactions de Belousov-Zabozinski etc.

Deux familles de déterminations sont à prendre en compte pour saisir ce qui constitue l'originalité du vivant en tant que système matériel. Ce sont d'une part les contraintes ou déterminations internes, celles propres à l'entité vivante et d'autre part, par sa nécessaire insertion dans l'environnement, les échanges continus d'énergie et de matière, la soumission à un faisceau de contraintes et de déterminations externes. C'est le jeu de ces deux familles de déterminations qui est au fondement de la constitution de l'autonomie de cette structure matérielle et de sa capacité à évoluer.

La question posée a également un rapport avec le degré d'autonomie dont devrait disposer une structure matérielle pour pouvoir être qualifiée de vivante. Et ce degré s'évalue entre deux extrêmes, l'un d'entière dépendance et l'autre d'indépendance totale par rapport aux contraintes environnementales.

Ce concept d'autonomie renvoie également à ceux d'auto organisation, d'auto reproduction, d'auto réplication. Ils constituent, sous-tendus par des mécanismes d'interactions complexes, comme l'annonce de cette quête d'un principe d'autonomie qui

s'inscrirait dans la matière et serait opposé aux principes hétéronomes agissant à l'extérieur du système vivant pour le constituer et le modeler. Mais par-là, on renouerait avec une forme de vitalisme, comme principe de structuration propre, inhérent à une certaine matière.

L'autonomie pose également la question de l'individuation. En biologie, l'individuation traduit le processus d'induction qui aboutit à la constitution de structures organiques complètes, à la création des caractères morphologiques d'un individu. Et le problème réside alors dans le rapprochement fait systématiquement entre l'autonomie et une individualisation topographique, un individu décrit à travers un contour physique définissant un intérieur et un extérieur. Et ce rapprochement systématique peut ne pas aller de soi dès lors qu'on le transforme en principe général applicable à tout le vivant. Par exemple chez les plantes à rhizomes, où se situe l'individu doté d'autonomie ?

L'individuation comme création des caractères morphologiques, comme formation de l'individu peut être abordé et traité sans ambiguïté dans le règne animal (peut-être avec quelques réserves s'agissant des insectes qui à travers leur métamorphose changent radicalement d'aspects) parce qu'on peut attribuer une histoire, une évolution temporelle à un individu, à « cet » individu qui change mais dont les changements se rapportent au même, comme une réalisation concrète de la métaphore du bateau de Thésée.

Simondon²¹⁸ applique le processus d'individuation comme processus de distinction d'un individu de l'ensemble des autres, à l'individu biologique comme processus de rencontre entre système individuant et système individué. La structure organique indivise s'inscrit dans un processus de transduction, chez Simondon l'opération de prise de forme sur fond de réalité pré-individuelle, comme un moment dans un processus qui réalise la rencontre entre deux ordres de réalités celui de la matière elle-même et celui de l'organisme individué.

²¹⁸ Simondon Gilbert. *L'individu et sa genèse physico biologique*. Presses Universitaires de France :1964

Donc comment penser l'individu biologique ? Si dans une première approche, le concept de vivant élémentaire se prête aisément à penser dans une même démarche unité matérielle de vie, autonomie, individualisation, car le concept a été pensé en cohérence avec ces notions ou encore dans le but de concevoir les principes d'un système matériel qui en permettrait leurs manifestations, les choses sont un peu plus complexes quand on repart de systèmes réels. On s'interrogera également, à travers le questionnement sur l'autonomie et l'individuation, si définir la vie ne nécessite pas d'en répartir les caractéristiques entre des entités matériellement individualisées et le système populationnel qu'elles forment. On modifierait en conséquence la relation vie = propriétés d'un système matériel, en introduisant une relation à plusieurs niveaux. La vie serait alors définie comme propriété d'un réseau collectif et complexe d'agents plus ou moins autonomes.

1.3.3 Vers une compréhension de la vie ? Les thématiques sous-jacentes

Le foisonnement définitionnel est révélateur de l'effort d'explication entrepris pour rendre compte de tel ou tel aspect du phénomène vital et l'insérer dans une vision complète du vivant. Explications que nous avons commentées en les mettant en rapport avec un questionnement fondamental : comment saisir la singularité du vivant. Et pour en rendre compte il n'y a -pour l'instant- pas de solution unique.

On dispose d'approches relevant de la biologie, de l'étude de la vie en tant qu'expression de phénomènes vitaux tels qu'ils se présentent au regard informé du scientifique. Elles font fond sur les approches biologiques qui traitent des structures moléculaires, des fonctions de la cellule. Elles s'inscrivent dans des évidences empiriques, celles opposant vie et non vie, celles inscrivant la vie dans l'organisation de la cellule analysée comme structure physico chimique, comme un tout composé et organisé dans lequel s'observent différentes fonctions (assimilation, désassimilation, croissance, multiplication), comme autant de manifestations d'une même dynamique structurale. Ces approches s'inscrivent dans un schéma général qui serait : la vie comme résultante d'une structure dynamique d'atomes et de molécules spécifiques qui se réalise à travers des autorégulations ; la vie comme organisation en action (avec les réserves à porter sur les phénomènes de vie latente) ; la vie comme propriétés d'une matière configurée dans une certaine structure. En résumé, est décliné un constat : la matière est telle qu'une structure donnée est vivante.

C'est ce que nous venons de présenter et ce constat conforte l'affirmation de Gyula Pályi (2002) qui fait de la définition de la vie la mère de toutes les questions²¹⁹ à laquelle les sciences de la vie ne sauraient échapper plus longtemps.

Ces explications multiples, en raison même des sources disciplinaires qui les inspirent renvoient à d'autres interrogations portant sur les cadres conceptuels mobilisés, ou encore sur les thématiques fondamentales mises en œuvre. Elles constituent les cadres de pensée dans lesquels s'exprime ou s'énonce la compréhension du vivant.

Ces approches font du vivant un objet relevant d'une déclinaison spécifique, propre à un système matériel, de principes communs de la physique et de la chimie. C'est par exemple l'affirmation, théoriquement fondée, d'une thermodynamique de non équilibre, de l'augmentation d'entropie négative comme toile de fond du déploiement des approches de la complexité spécifique, de l'organisation, de l'ordre opposé au chaos. On prolonge ainsi tout un questionnement autour de la différence entre inanimé et animé. On revient sur ce qui constituerait une sorte de frontière épistémologique : l'un relevant de la physique, de la chimie commune, l'autre relevant dès lors d'une déclinaison spécifique ou propre des principes généraux. Et la recherche, l'identification, la caractérisation de ces singularités, organise toute une démarche d'investigation et d'approfondissement tendant à constituer la compréhension du vivant autour d'un « propre » théorique : thermodynamique des structures dissipatives, systèmes non linéaires, complexité, systèmes auto catalytiques, systèmes réplicatifs, etc.

Le vivant est bien évidemment formé de matière, et ce qui pose question c'est comment et pourquoi celle-ci est organisée d'une façon si singulière. C'est dire que la question de la singularité du vivant ne se pose pas uniquement dans le constat empiriquement fondé, documenté par les sciences de la vie, mais est également tourné vers son origine. On tente alors de mobiliser les théories de l'émergence, de l'auto organisation, renvoyant aux conditions matérielles d'apparition de ces dispositifs matériels

²¹⁹ Gyula Pályi. *Fundamentals of Life*, déjà cité.

originels disposant du potentiel d'évoluer dans la durée.²²⁰ C'est donc l'évolution de la matière, organique, pré biotique que l'on tente d'imaginer dans une sorte de biologie des transitions chargée d'inventer le chemin, les étapes, conduisant au vivant « tel que nous le connaissons ».

Se constitue ainsi une interrogation : l'unité de la vie, la communauté de propriétés fondamentales, d'organisation de l'ensemble des êtres vivants n'est-elle la résultante que de la filiation seule de l'ensemble des formes vivantes actuelles à partir d'une forme matérielle originelle (d'un ensemble en interrelation de systèmes chimiques) constituée à la fin de la période géologique de l'Hadéen ? Ou doit-elle être associée à un principe constitutif qui pourrait être universalisable ? Car dans tous les cas, la durée, les dynamiques évolutives inscrivent le vivant dans une histoire dont il est nécessaire d'établir la chronologie afin de disposer d'une pleine compréhension.

La singularité du vivant serait ainsi non seulement fruit de son histoire évolutive, nécessairement singulière, mais relèverait également d'une constitution primitive originale lui conférant des propriétés singulières. L'approche peut paraître délicate tant elle renvoie aux conceptions pré scientifiques d'un principe de vie comme force autonome, comme principe ou comme cause des caractéristiques et propriétés vitales du vivant. Renverser la perspective ce serait donc pouvoir identifier ce qui – une certaine organisation matérielle - produirait l'effet vital ou serait la cause des propriétés vitales.

Car ces propriétés sont-elles mêmes singulières, notamment parce qu'elles renvoient sans cesse vers des structures matérielles -les vivants- qui seraient dotées de pouvoirs causaux propres, internalisés selon des modalités particulières fondant ainsi leur relative autonomie, les constituant en individualités. Et ces causalités propres reposant sur des mécanismes spécifiques, apparaissent à l'observateur comme hautement finalisés.

Finalement il s'agirait de pouvoir saisir, dans une démarche sous tendue par la

²²⁰ Comme le note M.C. Maurel : « le concept d'auto-organisation semble suppléer à celui de génération spontanée...la notion de propriété émergente s'impose » : Maurel Marie-Christine. L'avenir d'un passé très lointain. *Revue philosophique de la France et de l'étranger*, 2004/3, tome 129 : 277-283.

raison, l'essence de la vie dans une démarche scientifique unifiée. Celle-ci rendrait possible la définition des conditions nécessaires et suffisantes pour qu'un système matériel puisse être qualifié de vivant. Cependant, établir des critères de vie relève encore partiellement de l'arbitraire. Car certes nourris de ce que nous livre les sciences de la vie ainsi que les disciplines connexes et donc ancré dans le socle d'objectivité revendiqué par les sciences de la nature, le choix des fonctions, des structures, des matériaux élémentaires qui participent de la définition de ces conditions nécessaires et suffisantes, demeure devoir encore relever d'heuristiques particulières : origines de la vie, etc. et non résulter d'une théorie constituée de la vie.

Pour autant il nous a paru important de restituer ce qui dans des démarches convergentes (car focalisées sur le même objet d'interrogation) permet de donner corps à la réalité vivante et abandonner au regard des difficultés rencontrées la tentation qui ferait des concepts de vie, de vivant, simplement des commodités de l'esprit nécessaires à l'ordonnement de notre compréhension du monde.

Dans cette perspective on examinera dans les parties suivantes (partie III) des approches conçues autour du concept de vivant minimal qui, partant d'approches théoriques différentes, convergent pour saisir sur un plan fondamental l'essence même du vivant.

Et ces démarches, empruntant à des formalismes mathématiques appropriés pour la réalisation de modèles globaux du vivant élémentaire, s'inscrivent dans des thèmes qui réinventent et prolongent des problématiques inscrites dans l'histoire de la pensée scientifique et philosophique.

DEUXIEME PARTIE :

**LES THEMATIQUES RECURRENTES AUTOUR
DU**

PROPRE DU VIVANT

2. Les Thématiques récurrentes autour du propre du vivant

L'analyse du discours scientifique contemporain centré sur le vivant, entité biologique, laisse entrevoir des représentations parfois contrastées et pas toujours explicites de la vie. Au-delà des propriétés que dénotent le terme « vie », et qui visent à en expliciter le contenu, ce qui est également en jeu, c'est un ensemble de connotations, de présupposés non explicites, voire de préconceptions nourries de l'histoire de la notion de vie.

Et ce qui connote les termes de « vie », de « vivant », l'implicite qui rend possible un emploi souple et adaptable de ces termes dans les différents contextes de leur usage scientifique peut être mis à jour par la revue de la confrontation aux fins de connaissance, des hommes avec les vivants.

Ce que nous nous proposons donc dans cette partie c'est, à travers une sélection de quelques textes marquants de l'histoire des sciences de la vie, et plus largement de l'histoire de la pensée, identifier des réponses aux questions posées dans les essais répétés de caractérisation et d'identification du propre du vivant, de sa définition, comme autant de jalons qui ont marqué les efforts pour penser la vie et qui sous une forme dérivée, font encore écho dans nos approches contemporaines. Il s'agit donc de revisiter quelques questions et problèmes posés, en identifier les réponses et solutions apportées dans un passé parfois lointain par des philosophes, des médecins, des naturalistes, des physiologistes, et plus récemment encore par les biologistes. A travers leur compagnonnage avec les vivants ils nous révèlent une façon de les aborder, d'en tirer des enseignements, d'en caractériser les spécificités. Et nous tenterons de les mettre en regard des problématiques actuelles pour en révéler l'ombre portée dans l'actualité des définitions de la vie.

Nous souhaiterions donc éclairer cette actualité de la recherche du propre du vivant par la revue d'approches qui ont marqué l'histoire de la pensée, en terme de définition, de caractérisation de la vie, et cheminer à travers les tentatives répétées de cerner ce qui différencie les vivants des autres objets du monde, pour en dire ce qui

constitue leur originalité.

Ces tentatives renouvelées et partielles de définitions et de caractérisations de la vie se sont constituées à travers des approches qui participent tant de la métaphysique que d'un naturalisme positiviste. Elles sont certes historiquement et socialement situées, procédant de conceptions et de représentations du monde différentes des nôtres. Néanmoins, l'ambition de notre investigation sera de mettre en lumière des « *themata* »²²¹ qui organisent une sorte de toile de fond de longue durée mettant en jeu les rapports du sujet connaissant à son environnement vivant. Il s'agit de repérer, à travers l'examen de textes jalonnant l'histoire des sciences de la vie, les éléments sous-jacents aux concepts, méthodes, propositions et hypothèses qui sous-tendent le travail d'investigation scientifique. Ces éléments s'inscrivent dans des thèmes qui servent de point d'appui, parfois implicite, aux hommes de science, à la communauté scientifique pour constituer l'approche de leur objet d'investigation. Pour reprendre Holton, les *themata* de la connaissance scientifique sont des sortes d'images cognitives et de préférences pour certains types de concepts, méthodes, preuves et solutions pour aborder des questions ouvertes.

A travers l'histoire des définitions de la vie, des approches de compréhension des phénomènes vivants, nous essayerons donc de pointer ces questions qui restent en vigueur dans les efforts de théorisation plus contemporains.

Le parti pris défendu au travers une approche qui prend le risque d'une lecture transhistorique, est que ces questions renouvelées dans leurs formulations, voire dans l'esquisse des réponses fournies, demeurent présentes dans les réflexions contemporaines, comme une ombre portée, un arrière-plan de problèmes auxquels il faudrait sans cesse revenir et se confronter avec des moyens renouvelés.

C'est donc un parcours au travers des écrits d'auteurs aussi différents qu'Aristote, Platon, Lucrèce, Descartes, Haeckel, Linné, Stahl, Claude Bernard, Lamarck, Darwin,

²²¹ Holton Gerald, *Thematic Origins of Scientific Thought*. Revised Edition. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts and London, England, 1988

Loeb etc. qui sera entrepris.

Il s'arrêtera, volontairement à l'aube du 20^e siècle, avant donc le développement, l'explosion de disciplines comme la génétique des populations, la biologie moléculaire. Nous pensons en effet que cette explosion, pour certains une révolution des sciences de la vie, s'est produite sur le terrain préparé par les évolutions et ruptures introduites dans la connaissance du vivant les siècles précédents. C'est justement ce terreau que nous voudrions investiguer, nous réservant des explorations de l'histoire récente de la biologie, celle du 20^e et du début du 21^e siècle ultérieurement.

Deux axes d'interrogations structureront cette investigation. C'est d'abord celui portant sur la recherche de l'essence même de la vie, approche plus métaphysique que scientifique, car centrée sur une question plutôt essentialiste autour de la nature du vivant. Mais il s'agit d'une question que l'on ne saurait évacuer dès lors que l'on se soucie de vouloir caractériser ce qui structure si fortement l'organisation de la Nature.

L'autre axe en découle. Il aborde certaines des démarches mobilisées permettant de constituer l'unité du monde vivant. Il vise à repérer les schémas d'intelligibilité et les pratiques opératoires qui ont permis d'organiser la compréhension de ce monde que l'on qualifie de vivant.

2.1 Le propre²²² du vivant : questionner l'essence de la vie

Cette enquête menée dans l'histoire des idées pourrait s'intituler à la « recherche du propre de la vie ». Car ce dont il s'agit, c'est caractériser l'unité du monde vivant autour de ce qui constitue le propre du vivant. Cette recherche s'organise autour d'une opposition structurante, avec ce qui relève de la « non vie », de la nature inanimée, des choses sans vie. Elle conduit à interroger ce qui est au fondement de ce propre du vivant, et aller à la quête d'un principe qui unifie la diversité des manifestations vivantes, clef de la compréhension de cette Nature si particulière. C'est donc en essayant de comprendre cette opposition que se constituera la nature même de ce principe.

Principe propre aux choses vivantes, sans correspondance avec ceux du monde inanimé ou à l'inverse simple modalité d'organisation du monde ? Dans cette perspective, l'organisation, le fait d'être organisé, la finalité, le fait de poursuivre une fin, constituent sans nul doute des phénomènes majeurs, au fondement de la singularité du monde vivant. La finalité de l'être vivant se manifeste notamment à travers sa reproduction. Elle inscrit les vivants dans une histoire qui est celle de la vie de l'organisme, mais qui court aussi dans la succession des générations.

Le tableau d'ensemble de ce propre du vivant, nous essayerons de le restituer autour de quatre approches :

- le vivant dans l'opposition vie non-vie,
- la vie principe transcendant, *versus* la vie immanente à une structure matérielle,
- l'organisation comme question centrale des objets dotés de vie,
- le vivant comme communauté au sein d'une histoire longue.

²²² Nous continuerons d'utiliser ce terme dans son acception courante de : « qualité distinctive qui appartient à une chose.... » (Petit Robert). Dans les Topiques, Aristote opérait une distinction dans les modes d'attribution au sein du « propre ». Il y a le propre qui exprime l'essence du sujet, c'est la définition selon Aristote, et le propre qui n'exprime pas la quiddité du sujet (sa définition) mais exprime « ce » qui appartient à la chose seule.

2.1.1 Le vivant dans l'opposition vie, non-vie.

Partir de la vie comme donnée première conduit tout naturellement pour ainsi dire à la caractériser dans son opposition à la mort. C'est un fil conducteur de la pensée philosophique antique permettant de penser le propre de la vie dans son déroulement même qui mène de la naissance à la mort, mais aussi dans ce qui différencie l'animé de l'inanimé. Une grande interrogation nourrit cette réflexion, le propre de la vie renvoie-t-il à une essence substantiellement différente de celle d'autres manifestations inanimées de la Nature ?

- ***La vie donnée première organise le monde en animé et non animé***

Cette opposition est pour Aristote au fondement même de la caractérisation de la vie. « Nous posons donc, comme point de départ de notre enquête, que l'animé diffère de l'inanimé par la vie ». ²²³ Dans cette enquête, c'est à partir d'un critère de distinction manifeste, la vie, que l'auteur « De l'Âme » se donne l'objet même de son investigation naturaliste. L'opposition animé/inanimé organise le champ d'investigation, renvoie à une différence de principe constitutive d'une réalité. La caractérisation de ce principe, l'âme, comme propre du vivant est ce qui permet de rendre compte de ce pourquoi les vivants disposent de la capacité de « se développer de tous côtés et continuer à vivre aussi longtemps qu'ils sont capables d'absorber de la nourriture ».

Le principe d'animation des vivants se définit donc par la capacité à se développer de « tous côtés », par l'aptitude à maintenir leur être tant qu'ils possèdent le pouvoir de se nourrir. La formulation met l'accent sur cette dernière caractéristique comme condition nécessaire à la manifestation de la propriété vitale.

Dans la tradition hippocratique, le propre du vivant était caractérisé par une entité qui anime, un agent actif travaillant un agent passif. Cette approche est reprise par Aristote dans le cadre d'une science de l'être, de l'essence des choses. Et dans cet ordre d'idée, la matière, le substrat ne sera pas encore substance car nécessitant une

²²³ Aristote. *De l'âme*. Edition Vrin. Déjà cité.

détermination supplémentaire pour devenir une chose dont on pourra affirmer l'essence. S'agissant des vivants, les êtres dotés de la vie, cette détermination est donnée par la forme. La substance du vivant, son âme, est dès lors matière et forme.

L'âme est donc le principe qui subsume l'ensemble des fonctions propres au vivant, ses fonctions vitales. En tant que substance, ses modes et attributs seront au fondement du classement des espèces vivantes, constituant dans la même démarche le principe d'unification de l'ordre vivant et celui de sa différenciation interne.

« Pour l'instant, contentons-nous de dire que l'âme est le principe des fonctions que nous avons indiquées et qu'elle est définie par elles, savoir par les facultés nutritive, motrice, sensitive, dianoétique, et par le mouvement. » (Aristote De l'Âme)

- ***L'âme entre transcendance et immanence.***

L'âme ici, n'est ni une matière ni un sujet, elle est une sorte de raison ou de forme : «... le fait donc que l'âme est une certaine réalisation ou expression du corps qui a la faculté d'être tel, est un fait qui ressort de ce qui précède » (De l'Âme)

Elle constitue le propre de l'être vivant, ce par quoi la chose, vivante, est ce qu'elle est, ce qui fait ce qu'elle est et ce dont l'explicitation constitue la définition essentielle. Elle est la substance des vivants, composée indissociable d'une matière (substrat) et d'une forme qui la détermine. (Métaphysique livre Z).

Il ne s'agit donc pas d'un dualisme au sens développé par Platon, dissociant l'âme du corps, faisant de l'âme une substance externe ajoutée à un corps, une matière non animée, mais d'un hylémorphisme qui fait de tout être une association indissociable de matière et de forme.

Autrement dit encore, l'être vivant n'est pas un corps inanimé qui viendrait à la vie par l'entremise d'une âme. Corps et âme existent l'un par l'autre, et entre eux il n'y a aucune irréductibilité. Cela s'exprime aussi par le fait que dans un être vivant le corps physique s'accomplit dans l'âme et que l'âme détermine le corps. La distinction entre corps et âme ne relève alors pas d'une réalité ontologique mais d'une opération de l'esprit humain séparant pour la commodité du discours deux facettes d'une même réalité. C'est le vivant qui relève d'une réalité ontologique et cela a pour corrélat la détermination de la matière comme substrat inhérent à partir de laquelle quelque chose advient non comme

un accident mais parce que procédant d'une orientation, d'une finalité, d'une nécessité naturelle.

Galien (131-201) développe une perspective qui renoue avec le dualisme séparant âme et corps.²²⁴ Avec le deuxième des grands médecins de l'Antiquité après Hippocrate, l'âme redevient l'âme pensante d'un corps physique, matériel. C'est elle qui contrôle les facultés naturelles « attractrices, « rétentrices », « nutritives » etc. Mais ici, l'« âme végétative » platonicienne est naturalisée, physicalisée et sous contrôle de l'« âme pensante ».

L'apport nouveau de Galien, c'est le développement d'une physiologie finalisée exaltant l'arrangement des parties de l'organisme sous la forme d'organes-outils.²²⁵ Chaque partie dispose ainsi de facultés naturelles qui lui sont propres. En somme, on n'est pas loin d'une sorte de machine hautement spécialisée. Et la finalité n'y est plus liée à la forme comme chez Aristote, mais à l'utilité des parties. L'unité du vivant procède alors d'un principe de sympathie unissant les parties pour former le tout organisé. La parcellisation du corps est compensée par le rôle de l'âme qui dirige l'harmonie de tous ces principes. La vie s'inscrit dans une dualité mettant en jeu un domaine physique et un domaine spirituel, psychique.

Dans le prolongement de ces principes, la finalité, l'utilité des parties procède en dernier ressort d'un créateur extérieur au vivant. L'être vivant n'est plus sa propre cause en raison même de son essence propre. C'est une machine qui se forme et se maintient grâce au rôle de ce créateur.

²²⁴ Pichot André, *Histoire de la notion de vie. Chapitre III : Après Aristote. Galien et le finalisme*. Paris : Tel Gallimard, 1993

²²⁵ Selon la formulation de Pichot dans « Galien et le finalisme ».

- ***La vie, déclinaison particulière d'un regroupement d'atomes.***

A l'opposé, la tradition de pensée Epicurienne fait fond sur un atomisme ontologique. La réalité est celle du mouvement de chute des atomes. Le *clinamen*, déviation des atomes, autorise la formation de structures temporaires. Deux principes explicatifs remplacent la finalité : le choc des atomes qui permet d'explorer au hasard tous les agencements possibles pour arriver à ceux constituant notre monde par des « mouvements appropriés » d'une part, et d'autre part les « pactes » mystérieux par lesquels la nature se fixe des limites. Cela implique donc une causalité des phénomènes naturels et de la matière, affranchie de toute finalité : la nature n'est qu'une force aveugle. Le hasard y joue un rôle essentiel, notamment dans la constitution des êtres vivants. Lucrèce (premier siècle avant J.C.) s'inscrit dans cette tradition. La vie résulte d'un arrangement d'atomes, mais pas de n'importe quel arrangement. Ainsi Lucrèce fait référence aux « tourbillons » comme processus de structuration d'une matière en dynamique perpétuelle.²²⁶ Et c'est dans cette dynamique de structuration de la matière que s'insère le monde vivant. Elle se réalise dans un mouvement dialectique entre le hasard des rencontres entre atomes et la nécessité imposée par des arrangements d'atomes privilégiés : «... à force d'essayer tous types d'unions comme de mouvements, finirent par tomber sur des agencements tels que ceux que présente notre tout d'aujourd'hui... » (De la Nature des choses, I, 1024-1050). Les vivants s'inscrivent au sein de la diversité des formes atomiques en tant que « genre animé » doté de sensibilité :

« ...les choses, à présent que nous voyons sensibles.....sont faites de principes qui sont, quant à eux, insensibles....ces choses échappent à la vue....s'agencent comme il faut pour que ensuite soient engendrées des êtres animés.... » (De la nature des choses, II, 901-923).

C'est une approche matérialiste du vivant, de la vie. Le propre du vivant résulte d'un mouvement, d'une histoire, celui du choc de particules matérielles pour former des arrangements privilégiés.

²²⁶ Lucrèce. *De la nature des choses*. (I, 265-292). Le livre de poche. Librairie Générale Française, 2002

2.1.2 La vie entre physique singulière et physique commune : la vie principe transcendantal versus la vie comme propriété résultante

Si précédemment nous avons pu camper une opposition entre principe immanent et principe transcendantal, l'impact de la révolution scientifique²²⁷ renouvelle et enrichit cette problématique en la transférant sur la nature même des forces en jeu. Forces matérielles identiques à celles opérant dans le monde inanimé ou forces spécifiques qui seraient alors propres au monde vivant.

Le propre du vivant s'organise alors également autour de deux oppositions. D'abord celle des lois et principes qui régissent la matière non vivante au regard de ceux qui détermineraient le vivant, puis ensuite celle entre matière inerte, substrat du monde non vivant, et matière organique propre au vivant. Cette opposition recoupe également celle de la vie comme résultante d'une combinaison particulière de la matière dont il suffirait juste de révéler et d'expliquer la formation car procédant de l'universalité des lois de la physique, et celle de la vie relevant de principes, voire de lois encore méconnues, et qui par principe resteraient irréductibles à celles de la physique communes.

- ***La vie s'oppose à la matière par des principes ou des lois qui lui sont propres***

C'est notamment la résistance à la corruptibilité du corps qui entraîne le recours à un principe spécifique permettant à tout moment au corps de résister à la propension à se corrompre. Révélatrice dans ce sens, la critique du mécanisme cartésien par Stahl (1659-1734) :

Ce qui me choquait par-dessus de tout, c'est que dans cette théorie physique du corps humain, la vie (...) était passée sous silence, et que je n'en voyais nulle part une définition logique. J'eus beau chercher en effet, ce fut en vain : car aucun des propagateurs de ces prétendues doctrines n'a jamais dit et démontré ce que c'est, en quoi cela consiste, d'où provient, par quels modes, par quels moyens se maintient et subsiste ce que nous appelons la vie ; par quoi, enfin, et sous quel

²²⁷ Koyré Alexandre. *Du monde clos à l'univers infini*. Paris : Tel Gallimard, 1973, et *Etudes d'histoire de la pensée scientifique*, Tel Gallimard, 1973

point de vue le corps est dit vivant.²²⁸

Avec le mécanisme, affirmait le médecin Georg E. Stahl, « la vie disparaît ». Or le vivant doit se protéger d'une nature corruptrice, ce qui nécessite la présence d'un principe propre, d'une âme s'opposant à la décomposition du corps. Cette âme est pensée comme entité autonome et immortelle séparée du corps, s'opposant à sa corruptibilité, et non comme un principe vital diffusé dans la Nature.²²⁹ C'est l'agent capable de sentiment, d'appétit et de connaissance.

La physiologie de Stahl appréhende le vivant comme un composé hétérogène de corps mixtes dont la propension à se corrompre est annihilée par l'âme, force qui conserve. Le corps est donc conçu comme un arrangement, un organisme dont le principe naturel de corruptibilité est contrecarré par l'âme.

Notons cependant que les végétaux posent à Stahl un problème et reçoivent un statut particulier qui évite le recours à l'âme. C'est l'arrangement donné par la nature qui permet alors d'en faire des quasi-vivants. Les plantes restent donc des êtres mélangés non vivants, qui se propagent fortuitement et non par leur volonté (contrairement aux animaux).

Ce qui importe cependant, c'est que la vie est le pouvoir de conserver en son organisation et en son activité propre, l'agrégat complexe et fragile que constitue le corps vivant.

L'animisme de Stahl ouvrira le chemin à l'expression des courants vitalistes qui tenteront de cerner le propre du vivant dans des principes échappant aux lois et principes physiques communs de la mécanique rationnelle. La spécificité du vivant, saisie dans son opposition à la Nature (physique), introduit à l'affirmation d'un principe vital constituant le propre du vivant. Ce principe n'est pas toujours caractérisé sur le plan ontologique

²²⁸ Stahl Georges Ernst, *De la nécessité d'éloigner de la doctrine médicale tout ce qui lui est étranger*, Œuvres II, 224-225. Texte dans Pichot : *Histoire de la notion de vie*, Paris, Gallimard, 1993, p. 455

²²⁹ Voir l'article : Stahl Leibniz et la controverse du « *Negotium otiosum* » : Huneman Philippe, Rey Anne-Lise, Stahl, Leibniz et la controverse du *Negotium otiosum*, *Bulletin d'histoire et d'épistémologie des sciences de la vie*, Septembre 2007, p. 214-238

comme chez Stahl et est le plus souvent affirmé comme résultant de forces, d'actions, qu'il resterait à caractériser, à découvrir. On ouvre alors la voie à la recherche de lois propres aux vivants, exorbitantes pour ainsi dire des lois communes de la matière inorganisée.

Le mot vitalisme inventé par Théophile Bordeux (1722-1776) fédère alors un courant de pensée contestant le mécanisme cartésien et l'animisme de Stahl. Toute une série d'auteurs convergera autour d'un concept explicite ou implicite de propriétés vitales non réductibles au substrat matériel de l'organisme vivant et à ses lois physiques.

Ce vitalisme sera décliné sous forme de cause générale des phénomènes vitaux par l'embryologiste Caspar Friedrich Wolff, (1764-1794) comme une « *vis essentialis* » assurant la transformation de la matière inorganique en matière organique. Blumenbach (1752-1840) recourra à une force formatrice, une « *bildungstrieb* » qui rend possible la transition de l'amorphe à l'organisé.

Le médecin, anatomiste, poète et naturaliste Albrecht Von Haller (1708-1778) est l'auteur de nombreux travaux (dont les *Eléments de physiologies*) qui couvrent un champ d'investigations très large : mécanisme de la respiration, fonction autonome du cœur, rôle de la bile dans la digestion des graisses, développement de l'embryon, anatomie des organes génitaux et du système cardio-vasculaire, du cerveau. Et c'est à partir de ses travaux, de ses expérimentations sur le vivant qu'il a su proposer un système physiologique reposant sur les propriétés vitales des organes. En s'appuyant sur ses nombreux résultats expérimentaux, il élaborera un système dans lequel trois propriétés vitales des organes sont différenciées: la *sensibilité* pour les nerfs (l'excitabilité), la *contractilité* pour les tissus cellulaires (l'élasticité) et l'*irritabilité*, propre aux muscles et au cœur. C'est donc la mise en évidence de propriétés vitales, de propriétés spécifiques à travers une géographie corporelle affinée qui permet d'opérer la distinction radicale entre corps inertes et corps organisés.

Paul-Joseph Barthez (1734-1806), médecin à la Faculté de Médecine de

Montpellier, substitue également à l'âme stahlienne un principe vital, nom donné à la cause des phénomènes vivants :

Je n'ai jamais employé le nom de principe vital pour expliquer aucun des phénomènes de la vie ; mais uniquement pour rendre facile et sûre la formation de nouveaux résultats de ces phénomènes, le principe vital est donc le nom donné à la cause des phénomènes... »²³⁰

Barthez n'était clairement pas un adepte d'une approche substantielle de ce principe, ce n'est chez cet auteur qu'une cause première posée par hypothèse, comme cause de l'ensemble des phénomènes subsumés sous le terme de vie.

C'est sur un mode plus radical néanmoins que Xavier Bichat (1771-1802) affirmera l'existence d'un principe spécifique du vivant, principe de résistance aux lois physiques, aux lois opposées à la vie. Pour aller à l'essentiel, ce vitalisme considère que le vivant possède des caractéristiques spécifiques et irréductibles à une approche simplement mécanique ou physico-chimique. Il inscrit la vie dans une lutte permanente contre les lois physiques qui tendent à la détruire. Bichat²³¹ définit ainsi la vie par son opposition aux forces qui poussent à la mort : « La vie est l'ensemble des fonctions qui résistent à la mort. Tel est en effet le mode d'existence des corps vivants, que tout ce qui les entoure tend à les détruire ». C'est donc l'opposition entre la vie et le milieu extérieur et les lois physiques qui rendent compte de la vitalité du vivant. Mais ce principe vital ne renvoie pas à une réalité connaissable : « On le constate et on ne l'explique pas ». Il s'agirait d'ailleurs d'une recherche vaine en physiologie en raison des irrégularités et impossibilités d'une mathématisation. Ce qui est mis en exergue ici, c'est une spécificité du vivant résidant dans son instabilité, son imprévisibilité. La non répétitivité des phénomènes vivants interdit alors toute possibilité de réduction à une « formule générale » :

Les lois physiques sont invariables, éternelles et représentent toujours des phénomènes uniformes, et appliqués aux sciences de la vie les mathématiques ne peuvent jamais offrir de formules générales, contrairement aux lois physiques. Les lois vitales prennent sous l'influence des moindres causes mille modifications diverses.

²³⁰ Barthez Paul-Joseph, *Nouveaux éléments de la science de l'homme*. Jean Martel imprimeur du Roi.1778. Disponible sur : <https://play.google.com/books>.

²³¹ Bichat Xavier, *Recherches physiologiques sur la vie et la mort*. Paris : GF-Flammarion, 1994

Mais tout en affirmant l'irréductibilité des lois biologiques à celles de la physique, ce qui est néanmoins revendiqué c'est la compatibilité du vitalisme avec les principes généraux d'une démarche scientifique. Il s'agit en effet de cerner les relations causales entre ce principe et les phénomènes constatés :

Le rapport des propriétés comme causes avec les phénomènes comme effets est un axiome presque fastidieux à répéter aujourd'hui en physique et en chimie, si mon livre établit un axiome analogue dans les sciences physiologiques, il aura rempli son but.

Mais cette physiologie qui vise la fondation des sciences du vivant sur des principes propres, à l'image de la physique newtonienne, ne dira rien de la nature ultime des phénomènes.

Ce vitalisme se concevait donc plus comme un principe organisateur des vivants que comme l'affirmation d'une différence substantielle séparant le monde physique, matériel de celui du monde des vivants.

- ***Le substrat de la vie : entre matière propre et matière commune.***

Van Helmont (1579-1644) plaçait sa démarche de caractérisation de la vie dans une perspective légèrement différente. Ce « chimiatre » expliquait les phénomènes de la vie en recourant à une chimie très frustrée, à peine différenciée de l'alchimie. En résumé, pour ce « chimiatre » il n'existe plus de substance indifférenciée, mais des substances spécifiques, des « archées », des principes d'animation en œuvre dans le monde vivant et le monde minéral.²³² Et pour ce qui concerne le vivant, il s'agit alors d'archées propres à chaque organe qui leur confèreraient leur forme. Ces « archées » relèvent d'un principe non spirituel émanant de la substance des astres.

La spécificité du vivant pouvait donc également se décliner en spécificité de substance ou de substrat.

²³² « L'archée est l'agent de la génération...il porte en lui l'image de ce qu'il doit produire...il est parfois appelé esprit séminal... (il) n'est pas une forme immortelle, une âme...c'est un principe spécial.....un principe de vie ». Texte présenté dans Pichot : *Histoire de la notion de vie*. Tel Gallimard, 1993

John Needham prêtre et biologiste (1713-1781), célèbre par sa controverse avec Spallanzani (1713-1788), (Une anticipation du débat Pouchet Pasteur autour de la possibilité de génération spontanée) postulait l'existence non seulement d'une « *vis essentialis* » mais également d'une matière spécifique. La spécificité de la vie s'incarnerait en somme non seulement dans un principe vital mais également dans une matière spéciale formée de molécules organiques, particules ou « atomes vitaux ». Cette matière spécifique était le produit des décompositions, soit par voie digestive, soit par putréfaction. Ces molécules organiques sont ensuite associées par la nutrition, la reproduction, la génération spontanée et par une force végétative (un composé de résistance et d'expansion.)

Le principe vital s'inscrit donc à la fois dans la spécificité de la matière (organique) et d'une force d'expansion. L'organisation ne fait que canaliser la vitalité propre et sous ce rapport l'organisation est seconde, elle est la résultante de l'action de la force d'expansion sur une matière propre à la vie.

C'est également Buffon (1707-1788) qui concevra la spécificité du vivant autour d'une matière constitutive, fondement de son unité. Cette matière propre aux vivants est constituée de molécules organiques, particules matérielles, qui sans être vivantes par elles-mêmes, entrent dans des arrangements qui confèrent la vie. Mais contrairement au modèle initié par les réflexions de l'antiquité avec Lucrèce, cette physique d'agrégation relève de nouvelles forces, occultes, ne tombant pas sous le sens. La matière organique peut donc être composée sous l'influence d'une « *vis essentialis* » et constituer un vivant ou encore rendre compte du développement embryonnaire.

Si chez l'embryologiste Caspar Friedrich Wolf (1734-1794), représentant de l'école vitaliste allemande, la transformation de la matière inorganique en matière organique relevait également d'une « *vis essentialis* », c'est cependant l'intervention d'un « *nisus formativus* », une force plastique, qui rendra compte du processus d'organisation de la matière organique lors du développement embryonnaire.

Les interrogations relatives à l'existence nécessaire d'une matière spécifique support aux manifestations des propriétés vitales seront au cœur de nombreuses controverses à travers les réponses différenciées apportées par les chimistes du 19^e siècle.

Mais auparavant Lavoisier (1743-1794) avait démontré que la respiration équivalait à une combustion. La respiration ne sert plus à refroidir le sang du corps comme encore

dans la « Médecine Raisonnée » d'Hoffman.²³³ La chaleur perd son statut de propriété intrinsèque de l'animal vivant (Aristote), n'est plus le fruit d'une fermentation (Descartes). La nouvelle approche inscrit le vivant dans un environnement physique avec lequel il échange pour se maintenir et se transformer. La chimie, au sens moderne s'introduit dans le vivant et l'inscrit dans le monde physico chimique. Et le 19^e siècle amplifiera cette ouverture pour finalement banaliser la matière du vivant.

En effet, c'est à une véritable banalisation de la matière organique que l'on assiste avec les avancées de la chimie. Cette matière organique, ces composés organiques qui sont selon Jöns Jacob Berzélius (1779-1848) créateur de la chimie organique, de sa notation, de ses principaux concepts (allotropie, catalyse, isomérisation, protéine), les produits des corps organisés, va réintégrer une vision uniformisée de la nature chimique de la matière.

La controverse autour de la nature des agents responsables de la fermentation des sucres par les levures, leur transformation en alcool et gaz carbonique est révélatrice de ce mouvement. Berzelius soutenait que les fermentations étaient des processus résultant uniquement de l'action de substances chimiques, alors que Théodore Schwann (1810-1882) l'inventeur du terme métabolisme, avançait vers la fin des années 1830, que la fermentation des sucres par les levures était un phénomène de nature biologique, pour conclure que l'agent responsable de ce processus, la levure, devait être vivant. La conclusion provoqua à l'époque une controverse majeure avec des scientifiques de renom comme Wöhler (1800-1882) ou encore Liebig (1803-1873). Elle sera également alimentée par Pasteur qui travaillait sur d'autres microorganismes, eux aussi capables de provoquer la fermentation. La controverse prit fin en 1857 quand Büchner (1803-1897) réussit à reproduire la fermentation des sucres à partir de composants extraits de cellules de levure. Un composé organique (enzyme) extrait d'un organisme avait donc le même pouvoir que l'organisme lui-même.

En l'espace de moins d'un siècle, le langage et les approches auront changé. Le discours s'articulera autour des concepts et des principes de la chimie. La synthèse de

²³³ Hoffmann Fr. *La Médecine Raisonnée*. Traduction par Jacques-Jean Bruhier. Librairie Briasson, 1739. Disponible sur : <https://play.google.com/store/books/>

l'urée à partir de cyanate (F. Wöhler, 1828) s'inscrit dans le mouvement qui conduit à estomper²³⁴ les distinctions entre matière spécifique au monde organique et matière spécifique au monde minéral. Marcelin Berthelot (1827-1907), anti vitaliste farouche, réalisait la synthèse totale de l'acétylène en partant des composés de la chimie minérale. Son anti vitalisme fut conforté par chaque avancée dans la synthèse artificielle des principaux composés organiques : méthanol, éthanol, éthylène etc.

Le biologiste Ernst Haeckel (1834-1919), pouvait alors affirmer dans sa 13^e leçon en 1868 :

Il n'existe dans les animaux et les végétaux aucune matière primordiale qui ne se retrouve dans la nature privée de vie [...] Les différences chimiques et physiques existant entre les organismes et les non-organismes ne reposent pas sur la diversité de nature des éléments primordiaux qui les constituent, mais bien sur des modes spéciaux de combinaison chimique de ces éléments premiers.²³⁵

La biologie pouvait donc s'incorporer les méthodes et principes de la chimie. Ainsi, Jacques Loeb (1859-1924), réduira la vie à un ensemble de processus chimiques. Au tournant du 20^e siècle ce biologiste américain d'origine allemande, exprimait le refus radical de recours à un principe vital : la vie s'explique par les seules lois physiques et chimiques. Il développera une conception mécaniste de la vie, englobant dans le même schème explicatif les processus chimiques et l'organisation supérieure des vivants. C'est ainsi que la nature des chenilles sera réduite à n'être que la somme de processus chimiques, support explicatif des réactions de l'organisme aux sollicitations de l'environnement.²³⁶ Bien évidemment, avec les animaux supérieurs, le nombre de réactions possibles rend toute prévision de comportement impossible. Et plus généralement, pour

²³⁴ Il convient d'être prudent sur le rôle effectif joué par la découverte de Wöhler dans l'abandon d'un vitalisme organique. Ainsi que l'a montré B. Bensaude-Vincent, l'expérience conduite par Wöhler n'a pas définitivement clos la croyance à l'existence d'une force vitale chez des auteurs comme Berzélius ou Liebig. Son apport a surtout été apprécié par la mise en évidence expérimentale de l'arrangement des atomes (isomérisation) dans l'expression des propriétés des molécules organiques. Bensaude-Vincent B., Isabelle Stengers. *Histoire de la chimie*. Paris : La découverte, 1993

²³⁵ Haeckel Ernst, *Treizième Leçon*, p 290. 1868. Cité par Anne Fagot-Largeault, 2006. Collège de France : *Ontologie du Devenir*.I.2

²³⁶ Loeb Jacques. *Forced movements, tropism and animal conduct*, 1918. Disponible sur : <https://archive.org/details/forcedmovements00loeb>

expliquer le comportement des organismes vivants, les tropismes seront substitués aux instincts.

Dans ce mouvement de banalisation de la matière vivante, Loeb sera même conduit à critiquer le recours à une chimie spéciale, celle des colloïdes pour expliquer la vie, en montrant que la chimie classique (les lois stœchiométriques des équilibres chimiques) ou la physique des solutions ionisées (par ex. l'équilibre de Donnan, ou équilibre entre solutions ioniques séparées par une membrane semi perméable), rendait compte des phénomènes observés par le chimiste Ostwald.²³⁷ Selon Loeb, la chimie classique était parfaitement capable de rendre compte des niveaux intermédiaires d'agrégation des molécules. C'est donc un refus radical de recours à un principe vital pour rendre compte des phénomènes vivants, principe dont l'énoncé même constitue une impasse explicative, comme si les propriétés de l'eau pouvaient être expliquées par son « aquosité ». Pour Loeb la vie commence :

...avec l'accélération de la vitesse d'oxydation, et cette accélération a pour point de départ la destruction de la couche corticale de l'œuf. La vie des animaux à sang chaud -y compris l'homme- se termine quand les oxydations cessent dans l'organisme.

La chimie et la physique sont donc communes aux vivants et au non vivant. La différence entre ces deux ordres ne résulte plus que d'un mode de combinaison différent d'éléments primordiaux communs.

Claude Bernard avait cependant noté, en évoquant cette chimie commune à l'ensemble du monde, qu'elle recourait à des processus de synthèses différents, et pour reprendre le terme même de l'auteur des « Leçons sur les phénomènes de la vie »²³⁸ à un « chimiste différent ». La Nature recourrait donc à des processus de synthèse différents de ceux employés par le chimiste de laboratoire. Et cette question demeurera (au 19^e siècle) : quels sont donc ces modes spéciaux de combinaison ?

²³⁷ Loeb Jacques. *Proteins and The theory of colloidal behavior*. 1922. Disponible sur: <https://archive.org/details/proteinstheor00loebrich>.

²³⁸ Bernard Claude. *Leçon sur les phénomènes de la vie communs aux animaux et aux végétaux*. Déjà cité.

Et alors, si on n'appréhende plus le propre du vivant à travers des lois spécifiques, une matière propre, mais dans des combinaisons singulières, comment en rendre compte à partir des éléments chimiques primordiaux que Mendeleïev inscrivait dans son tableau de classification systématique des éléments chimiques (1870) ? Car pour autant, avait-t-on définitivement jeté les bases d'une réduction du vivant à ses seuls composés élémentaires ?

Se reforme néanmoins un chemin, celui de la recherche d'une spécificité de la matière comme fondement de la particularité du vivant, permettant alors d'ouvrir de nouveaux questionnements sur la particularité de cette chimie du carbone, de cette chimie des macromolécules et qui reposera la question de la singularité du vivant à nouveaux frais, pour entrevoir cette fois-ci la nécessité de composés propres au vivant, certes non plus différents en nature de ceux formant le reste du mobilier du monde, mais spécifiques par leurs déclinaisons autour d'entités particulières formées de carbone organisé en longues chaînes dans lesquelles les conformations, les stéréospécificités, mais aussi les mouvements locaux renouvellent les problématique substrats/formes.

- ***Vie immanente et vie résultante du jeu de forces opposées.***

Spinoza avait développé une métaphysique opposée au mécanisme et au dualisme cartésien pour avancer une conception immanentiste de la vie. L'essence actuelle d'un corps est son *conatus*, l'effort pour persévérer dans son être. La vie est alors sa propre cause, elle est également puissance. Dans cette approche métaphysique, l'essence de la vie est posée de façon originale. Il n'y a plus qu'une substance unique qui constitue le monde et dont les déclinaisons particulières, comme les êtres vivants, n'en sont que des attributs. La vie devient une propriété ou un attribut de Dieu, substance du monde et cet attribut est immanent aux choses de la Nature :

Nous entendons donc par vie la force par laquelle les choses persèverent dans leur être ; et comme cette force est distincte des choses elles-mêmes nous disons proprement que les choses elles-mêmes ont de la vie. Mais la force par laquelle Dieu persévère dans son être n'est autre chose que son essence ; ceux-là parlent

donc très bien qui disent que Dieu est la vie²³⁹

Le siècle des Lumières substitue la Nature à Dieu, constituant ainsi les fondements des «spinozistes modernes» selon Diderot. Dans l'article «Spinoza» de l'Encyclopédie Diderot affirmait :

Il ne faut pas confondre les Spinozistes anciens avec les Spinozistes modernes. Le principe général de ceux-ci, c'est que la matière est sensible, ce qu'ils démontrent par le développement de l'œuf, corps inerte, qui par le seul instrument de la chaleur graduée passe à l'état d'être sentant et vivant, et par l'accroissement de tout animal qui dans son principe n'est qu'un point, et qui par l'assimilation nutritive des plantes, en un mot, de toutes les substances qui servent à la nutrition, devient un grand corps sentant et vivant dans un grand espace. De-là ils concluent qu'il n'y a que de la matière, et qu'elle suffit pour tout expliquer; du reste ils suivent l'ancien spinozisme dans toutes ses conséquences.

Vie et matière peuvent donc être conjuguées dans une même démarche de compréhension. Ainsi dans cet ordre d'idée le vitalisme fera l'objet de nombreuses critiques durant tout le 19^e siècle afin d'en estomper le caractère radical, ou encore de le rejeter au nom d'un matérialisme méthodologique. Magendie (1783-1855) critiquera l'opposition âme matière au nom de la lutte contre un système posé a priori et ce au profit de démarches expérimentales. Sur un plan plus théorique, Etienne Geoffroy Saint-Hilaire (1772-1844) dans la Gazette médicale de Paris,²⁴⁰ rejettera le vitalisme comme théorie fautive ne faisant que combler une méconnaissance temporaire, celle de l'impulsion initiale qui a conduit à l'ajustement si parfait des parties formant un corps organique. La comparaison fine entre corps vivants et corps bruts ne fait que conforter la justesse de l'application des lois générales (de la chimie, de la physique) aux organismes vivants.

C'est encore Claude Bernard²⁴¹ qui transformera l'opposition structurelle, entre forces externes au vivant, les forces physiques, et forces internes, les forces vitales propres

²³⁹ Spinoza, *Pensées Métaphysiques Deuxième partie Chapitre VI*: de la vie de Dieu. Disponible sur : www.spinozaetnous.org/

²⁴⁰ Saint Hilaire Geoffroy, *Gazette médicale de Paris*, 1839, II, 9 ; et réponse à quelques objections, *ibid.*, 62;1831. L'auteur compare les corps vivants aux corps bruts, et montre le défaut de solidité des bases, sur lesquelles repose la doctrine des vitalistes.

²⁴¹ Bernard Claude. *Leçon sur les phénomènes de la vie communs aux animaux et aux végétaux*. Première leçon : « L'observation et l'expérience nous apprennent que les manifestations de la vie ne sont l'œuvre ni de la matière, ni d'une force indépendante ; qu'elles résultent du conflit nécessaire entre les conditions organiques préétablies et des conditions physico-chimiques déterminées »

au vivant, en une dualité de phénomènes constitutifs présidant à sa structuration au cœur même de son organisation. Cette dualité est internalisée et inscrite dans l'intimité du vivant. Sur fond de récusation du vitalisme comme :

... erreur irrémédiable, qui consiste à considérer comme force une personnification trompeuse de l'arrangement des choses, à donner une existence réelle et une activité matérielle, efficace à quelque chose d'immatériel qui n'est en réalité qu'une notion de l'esprit...

Claude Bernard affirme la coexistence au sein même de tous les êtres vivants de deux sortes de phénomènes, l'une de « création vitale ou de synthèse organique », l'autre de « morts ou de destruction organique ». La force vitale se réduit alors à une métaphore permettant de nommer « des phénomènes qu'elle ne produit pas ». La force vitale n'est donc qu'une illusion, celle d'une cause qui subsumerait toutes les causes partielles. Claude Bernard notera que cette cause hypothétique, ne pourrait être qu'une « force directrice » et non une personnification.

La vie ne relève donc plus d'un principe recteur immatériel mais est tissée dans l'activité même de la matière organisée. Léon Rostan (1790-1866), médecin français, disciple de Pinel, prédécesseur de Charcot et de Vulpian à la Salpêtrière, affirmait dans cet ordre d'idée qu'« il n'existe pas (...) de propriétés vitales indépendantes de la matière organisée ». Ainsi, tous les actes que l'on a attribués à des propriétés vitales (Bichat), à un principe vital (Barthez), à des forces vitales (Chaussier), ne sont dus qu'à des conditions organiques aidées de l'innervation.

Le vitalisme est donc rejeté au motif que sur le fond il n'explique rien, et qu'il s'agit au mieux d'une façon de parler et au pire d'une impasse scientifique.

Cependant l'approche, qui fait de la vie une propriété résultante d'un arrangement de la matière, matérialiste, moniste, engage elle-même de nouveaux défis. Car comme le note Claude Bernard, ce ne peut être une union fortuite de phénomènes physico-chimiques qui construit chaque être selon un plan et suivant un dessin fixé et prévu d'avance. Il est nécessaire d'identifier le processus « législatif » qui dirigerait les

phénomènes appelés vitaux.

Le rejet des « formes substantielles » pour reprendre le langage de René Descartes ouvrira de nouvelles perspectives d'investigations. En faisant écho à l'une de ses propres remarques²⁴²:

Qu'un autre donc imagine, s'il veut, en ce bois, la forme du feu, la qualité de la chaleur et l'action qui le brûle, comme des choses toutes diverses ; pour moi, qui crains de me tromper si j'y suppose quelque chose de plus que ce que je vois nécessairement devoir y être, je me contente d'y concevoir le mouvement de ses partie...

c'est tout un programme d'investigation qui se réalisera, centré sur les arrangements des parties, de la matière.

Il s'agira donc d'étudier, de révéler ce mode spécial d'arrangement qui fait qu'un vivant diffère du non vivant, donc de mettre à jour les « modes spéciaux de combinaison chimique des éléments primordiaux » (Haeckel).

Cela ne signa pas l'abandon définitif du vitalisme, comme si la nécessité de saisir la singularité du vivant dans un monde descriptible et explicable en terme purement physico-chimique ne permettait pas d'élucider totalement ce qui différencie le vivant de l'inanimé. Une des attitudes les plus intéressantes de ce balancement entre conjectures qui mobiliseraient des « forces spéciales » afin de rendre compte de la particularité du vivant et celles qui feraient fond sur les seules propriétés physico chimiques de la matière (propriétés connues ou à connaître) est celle de Rudolf Ludwig Karl Virchow. L'auteur de la théorie cellulaire avait exposé des thèses vitalistes dans un ouvrage paru en 1856 : « *Alter und Neuer Vitalismus* ». ²⁴³ Néanmoins 50 années plus tard, à l'occasion d'une conférence tenue à Londres il expliquait que : « Les cellules sont composées de substances chimiques organiques, qui ne sont pas vivantes par elles-mêmes, mais dont l'arrangement

²⁴² Descartes René. *Le Monde. Chapitre II : En quoi consistent la chaleur et la lumière du feu*. Paris : Classiques Garnier Edition de F. Alquier, 2010

²⁴³ Virchow Rudolf Karl Ludwig. *Alter und neuer Vitalismus*, Archiv für pathologische Anatomie und Physiologie und für klinische Medicin, Springer, 1856, 9 : « Sie [die Lebenskraft] ist nicht bloss der Grund, die Ursache des Lebens, sondern auch das Resultat desselben, indem sie sich von Stoff zu Stoff fortsetzt und eine kontinuierliche Reihe von Bewegungserscheinungen hervorbringt, deren gemeinschaftlicher Charakter eben das Leben ist. »

mécanique détermine la direction et la force de leur activité». ²⁴⁴ Comme si la « force vitale », localisée au sein de la cellule trouvait alors sa résolution par la composition et l'organisation même de cette cellule.

Pourtant, le biologiste Hans Driesch (1867-1941) continuera encore de s'inscrire explicitement durant toute la première partie du 20^e siècle dans la tradition vitaliste, recourant à l'« entéléchie », force immanente aux êtres vivants afin de rendre compte de la morphogenèse : la formation à partir de cellules totipotentes de la diversité des organismes. De même, le neurologue Joseph Grasset (1849-1918) restera ouvertement vitaliste. Et sur un plan épistémologique, Louis Vialleton (1859-1929), professeur d'anatomie comparée, envisagera l'organisme comme une propriété spécifique de la vie, la morphologie devenant l'expression moderne du Principe Vital, ²⁴⁵ comme une nécessité de réintroduire les causes finales à côté des causes matérielles et des causes efficientes :

Mais ces deux sortes de causes ne s'excluent pas ; en biologie, notamment, loin de s'opposer, elles se complètent. Les causes physico-chimiques ont bien le rôle que leur attribuent les mécanistes, mais l'ordre de leur succession, la nature et les résultats de leur intervention sont réglés à l'avance par l'organisation de l'être qui en est le siège.

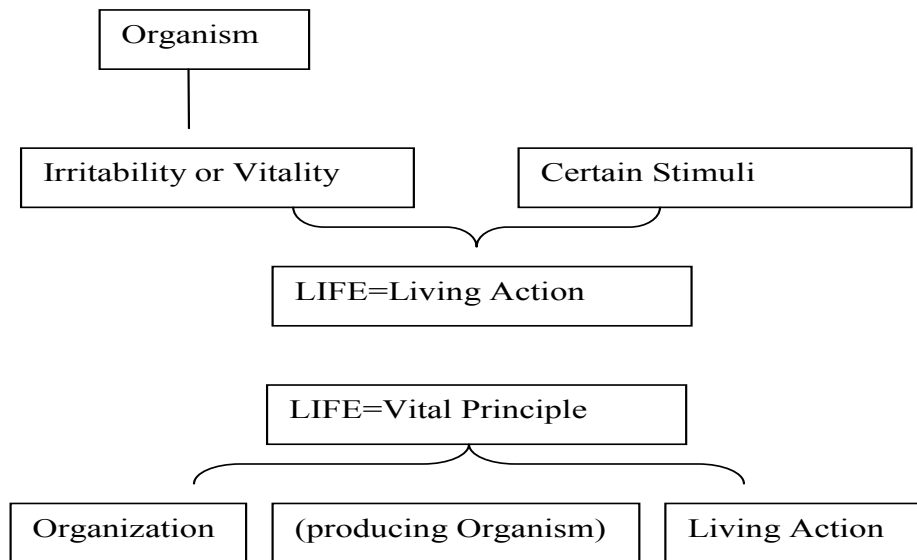
A travers ces interrogations mettant en jeu soit la spécificité des propriétés du vivant, soit celle de sa matière, s'esquissent deux approches, deux voies de caractérisation de la vie, du vivant. L'une serait celle qui tente d'en saisir le fondement dans la recherche d'un principe vital autonome ; l'autre serait celle qui rechercherait ce fondement comme résultant d'un état de la matière qu'il ne reste plus qu'à caractériser.

Un schéma, présenté dans « Theories of Life and Organization in Britain » (1790-1835) résume les données du débat. Les propriétés vitales étant corrélatives à une certaine forme de structures organisées, le débat se noue entre ceux qui pensent les propriétés

²⁴⁴ Virchow Karl Ludwig. The Huxley Lecture on recent advances in Science and their bearing on medicine and surgery. Delivered at the opening of the Charing Cross Hospital Medical School, 1898. Disponible sur : <https://archive.org/stream/georgiajournal>. : « Cells are composed of organic chemical substances, which are not themselves alive, but the mechanical arrangement of which determines the direction and power of their activity ».

²⁴⁵ Lavabre-Bertrand Thierry. Le vitalisme de l'École de Montpellier. *Repenser le vitalisme*. Dir. par Pascal Nouvel. Presses Universitaires de France, Science Histoire et Société, 2011

vitales (par exemple l'irritabilité des tissus) comme résultant d'une forme d'organisation de la matière et ceux à l'inverse pour qui organisation et propriétés vitales résultent d'un principe qui transcende la matière ou qui se différencie de ses propriétés physiques



Diagrams from John Fletcher, *Rudiments of Philosophy* (Edinburg, 1836), pages 16 and 17
In. L;S; Jacyna. *Theories of Life and Organization in Britain, 1790-1835*

246

Vie comme principe vital, vie comme résultante

2.1.3 L'organisation, propriété singulière des êtres dotés de vie

Cette problématique introduit une autre façon de singulariser le propre du vivant. L'originalité du vivant, c'est celle d'un être organisé dont les parties en relation de « sympathies » (Galien) concourent à la réalisation de sa finalité : se maintenir en l'état.

L'identification des êtres vivant aux êtres organisés, à tel point que les deux

²⁴⁶ Jacyna L.S., *Immanence or Transcendence: Theories of Life and Organization in Britain, 1790-1835*. *Isis*, 1983, Vol. 74, No. 3, pp. 311-329. Disponible sur : <http://www.jstor.org/stable/232592>

expressions deviendront synonymes, renvoie à un propre du vivant se constituant autour de l'organisation, manifestation tangible de la spécificité du vivant par rapport à la matière inanimée. Dans cet ordre de pensée, l'organisation exprime l'idée d'une chose hautement finalisée. Elle renvoie à la manifestation d'une finalité ultime, celle pour un ensemble constitué de parties assurant des fonctions déterminées de se maintenir, se reproduire, se développer.

Cette spécificité de la relation de parties au tout d'un être, sera appréhendée en recourant à une thèse forte identifiant le vivant organisé à la machine, ou à des démarches plus empiriques présentant l'organisation comme ordonnatrice du jeu complexe des forces physico chimiques.

- ***La machine vivante.***

Chez Galien (131-201), chacune des parties du corps humain a une utilité propre. Leur articulation harmonieuse à l'instar des pièces d'une machine rend possible la vie de l'ensemble. C'est l'approche d'un médecin exaltant l'arrangement, le rôle des organes par l'analyse de leur finalité, qui développe ainsi un concept d'organe-outil.²⁴⁷ La finalité procède de l'utilité des parties au bénéfice du vivant, et est interprétée à travers un schème de pensée machiniste. L'organe en symbiose avec le reste du tout est saisi comme un dispositif résultant de facultés naturelles, conçu pour réaliser une certaine tâche comme un outil.

Descartes au 17^e siècle amplifiera ce déplacement vers le vivant présenté comme assemblage d'organes-dispositifs. Mais, aux facultés naturelles propres à chaque organe, il substitue les principes de la mécanique afin de rendre ainsi compte de leur fonctionnement au sein de la machine animée.

Le machinisme de René Descartes écarte alors toute différence de nature (substantielle) entre êtres animés et inanimés. Les vivants sont des machines fonctionnant

²⁴⁷ Pichot A., Histoire de la notion de vie. *Le finalisme Galénique*. Déjà cité.

à l'image des machines artificielles créées par l'homme. Ce dernier demeurera néanmoins le seul vivant disposant d'une âme, d'une « substance pensante » qui lui est propre. Pour le reste, les esprits animaux, ne sont plus que des fluides ténus (subtils) qui jouent un rôle d'animation homologue aux fluides des mécaniques artificielles créées par l'homme. Ce machinisme procède d'un mécanisme de contact rejetant tout ce qui relève de l'action à distance, comme étant celle de « forces occultes ». Celles-ci réintégreront les champs de la mécanique rationnelle à partir des travaux de Newton.

Dans les Principes de la Philosophie, Descartes affirmera :

Je ne reconnais aucune différence entre les machines que font les artisans et les divers corps que la nature seule compose (...) » : l'animal machine, l'homme supposé « -(n'être) autre chose qu'une statue ou une machine de terre.

C'est alors tout un projet d'investigation de la vie par le mécanisme qui se mettra en place. La différence radicale, constitutive entre monde animé et inanimé disparaît (sauf pour l'homme) et la singularité du vivant devra être recherchée et caractérisée au sein même d'une unité ontologique, celle d'un monde dont la « substance étendue » en constitue le fondement, et non plus dans une substance ou un substrat propre aux êtres vivants. Le matériau vivant se fond dans le mobilier du monde et la caractérisation de la vie se déportera vers la recherche de modalités d'arrangements, de géométries particulières de la « substance étendue », descriptible par « figures et mouvements » pour reprendre les concepts de René Descartes.

- ***La machine ajustée pour accueillir la vie***

Identifier le vivant à la machine, met l'accent sur un problème, celui du mécanisme organisé, c'est-à-dire d'un mécanisme inséré dans un ensemble finalisé unifiant cause efficiente et cause finale. L'analogie machine/être vivant, c'est l'analogie entre une mécanique organisée et l'organisme vivant pris comme un ensemble de dispositifs ajustés réalisant une fonction donnée. Et c'est cette métaphore mécanique de l'organisme vivant qui introduira aux différences essentielles entre ces deux figures.

Stahl, le grand médecin du 17^e siècle, rejette la mécanique cartésienne car elle ne permet pas d'introduire la finalité et de fonder une conception de l'organisme en tant que tout poursuivant une finalité.²⁴⁸ Pour ce médecin, s'agissant du plan de l'analyse causale, la cause efficiente et la cause formelle doivent être associées afin d'expliquer la spécificité du vivant, son organisation.

Kant dans la « Critique de la Faculté de juger » notera que :

Dans une montre, une partie est l'instrument qui fait se mouvoir les autres ; mais un rouage n'est pas la cause efficiente qui engendre les autres ; une partie, il est vrai, existe pour l'autre, mais non par cette autre. La cause efficiente de ces parties et de leur forme n'est pas dans la nature (de cette matière) mais au-dehors, dans un être qui peut agir en vertu d'idées d'un tout possible par sa causalité.... Un être organisé n'est pas seulement une machine - car celle-ci ne détient qu'une force motrice -, mais il possède une énergie formatrice qu'il communique même aux matières qui ne la possèdent pas (il les organise), énergie formatrice qui se propage et qu'on ne peut expliquer uniquement par la puissance motrice (le mécanisme).²⁴⁹

Pour résumer, dans le vivant non seulement les parties sont là pour les autres (comme dans une machine), mais sont également là par les autres. Il existe dans l'organisme une coopération des parties qui dépasse toute réduction à une force motrice.

Une réponse possible à ces objections, renouvelant et fondant une autre assise théorique au mécanisme applicable aux sciences du vivant, se constituera en inspiration de la métaphysique leibnizienne. Il s'agit d'une mécanique, d'une physique qui récuse la « substance étendue » cartésienne, la géométrisation de l'espace, au profit d'une physique dynamique.²⁵⁰ Les vivants sont des machines, mais des machines de la Nature, des « inventions divines » ontologiquement différentes de la machine humaine car divisibles à l'infini en conservant leur propriété de machine. Dès lors les finalités des machines vivantes sont immanentes à leur organisation. Elles relèvent d'un mécanisme analysable et décomposable à l'infini. Dans cette perspective, tout phénomène s'accomplit mécaniquement dans l'organisme vivant mais sans que l'on puisse tout expliquer

²⁴⁸ Stahl Georg Ernst, *Différence entre mécanisme et organisme* (œuvres II 281 282). Texte dans Pichot A. Histoire de la notion de vie : L'animisme de Georg-Ernst Stahl.

²⁴⁹ Kant Emmanuel. *Critique de la faculté de juger*. V, 374 V, 375. Ed Gallimard, 1985

²⁵⁰ Sur un plan métaphysique la force vive, force mouvante renvoie à l'élément formel de la substance, intégrale des forces « mortes ».

mécaniquement dans les actions qui s'y déroulent. Car chez Leibniz les raisons fondamentales de l'ordre mécanique échappent à toute analyse mécaniste et ne peuvent conduire qu'à des modélisations mécaniques provisoires :²⁵¹

L'organisme des animaux est un mécanisme qui suppose une préformation divine : ce qui en suit est purement naturel, et tout à fait mécanique. Tout ce qui se fait dans le corps de l'homme, et de tout animal, est aussi mécanique que ce qui se fait dans une montre : la différence est seulement telle qu'elle doit être entre une machine d'une invention divine, et entre la production d'un ouvrier aussi borné que l'homme.²⁵²

Ce qui permet à Leibniz d'associer étroitement causes efficientes et causes finales :

Ces principes m'ont donné moyen d'expliquer naturellement l'union ou bien la conformité de l'âme et du corps organique. L'âme suit ses propres lois et le corps aussi les siennes, et ils se rencontrent en vertu de l'harmonie préétablie entre toutes les substances, puisqu'elles sont toutes des représentations d'un même univers.

Les âmes agissent selon les lois des causes finales par appétitions, fins et moyens. Les corps agissent selon les lois des causes efficientes ou des mouvements. Et les deux règnes, celui des causes efficientes et celui des causes finales, sont harmoniques entre eux.²⁵³

Ce contexte de pensée conduit le médecin et botaniste Boerhaave (1668-1738), dans « Institutions et médecine » (Tome1), à voir le corps comme un ensemble de dispositifs hydrauliques organisé afin de permettre son union avec l'âme. La machine corporelle y est très finement organisée afin d'assurer, selon les principes de la métaphysique leibnizienne, une union intime et harmonieuse avec l'âme. Le propre du vivant est saisi en mettant l'accent sur l'organisation spécifique qui permet l'exercice d'un principe d'animation vital. Ce principe est certes transcendant chez Boerhaave, mais sera également, par la suite chez d'autres physiologistes et médecins, pensé comme principe immanent à l'organisation vivante.

De même, le médecin Friedrich Hoffman (1660-1742), rival de Stahl recherche les fondements de sa médecine dans une dynamique non cartésienne faisant fond sur celle de

²⁵¹ Duchesneau F., *Leibniz le vivant et l'organisme*. Paris : Mathesis Vrin, 2010

²⁵² Duchesneau F., Leibniz Stahl Divergence sur le concept d'organisme. *Studia Leibnitiana*, 1995, Bd. 27, H. 2 pp. 185-212. <http://www.jstor.org/stable/40694276>.

²⁵³ Leibniz. *Monadologie*.79. Disponible sur : <http://bibliotheque.uqac.quebec.ca/index.htm>.

Leibniz. Elle est mécanique, mais recherche dans la dynamique des corps matériels, dans la théorie intégrée des forces, l'explication des phénomènes vitaux telles les sécrétions ou la contraction musculaire. Le corps est conçu comme une machine particulière (différente de celles conçues par l'esprit humain) car composé de différentes parties adaptées les unes aux autres avec tant d'art qu'elle produit des mouvements réglés et déterminés. La vie c'est le mouvement des fluides dans le corps et du sang entraîné par le cœur :

« la vie.....qui n'est, selon nous, qu'un mouvement circulaire du sang et des liqueurs, causé par le relâchement et le resserrement successifs des solides qui préserve le corps d'une corruption imminente.²⁵⁴

La définition de la vie est ici la conclusion de la physiologie et non son fondement. Le dualisme chez Hoffmann entre matière et esprit ne se traduit pas par une opposition âme matière, mais par leur union, la « conformité » de l'âme et du corps. Dans cette approche l'esprit intervient sur tout corps de l'univers physique en tant que principe spirituel ordonnant le monde, garantissant son harmonie.

- ***L'organisation oriente le jeu des lois physiques.***

Le thème de l'organisation de la matière comme fondement de la vie, est repris par Lamarck dans la Philosophie zoologique (1809) :

la vie, dans les parties d'un corps qui la possède, est un ordre et un état de choses qui y permettent les mouvements organiques ; et ces mouvements, qui constituent la vie active, résultent de l'action d'une cause stimulante qui les excite.²⁵⁵

Cette définition s'oppose à celle, phénoménologique, énoncée par le chirurgien et physiologiste Anthelme Richerand (1779-1840) décrivant la vie comme «... une collection de phénomènes qui se succèdent, pendant un temps limité dans les corps organisés ». Elle livre le principe d'un fondement physique de la vie :

Ce sont sans doute des objets bien importants que ceux de rechercher en quoi

²⁵⁴ Hoffmann Friedrich. *La Médecine raisonnée*. Traduit par Jacques Jean Bruhier. Paris : Briasson Editeur, 1742, p.58

²⁵⁵ Lamarck Jean-Baptiste, Philosophie zoologiqueI, 362-363. Disponible sur : http://www.lamarck.cnrs.fr/ice/ice_book_detail-fr-text-koyre_lamarck-ouvrages_lamarck-29-1.html

consiste ce qu'on nomme la vie dans un corps (...) Quelque difficile que soit ce grand sujet de recherche, les difficultés qu'il nous présente ne sont point insurmontables; car il n'est question, dans tout ceci, que de phénomènes purement physiques.²⁵⁶

Lamarck pense la vie à partir de l'orgasme, état de tension, d'excitation, de turgescence, dans un tissu ou un organe. C'est cette force de tension qui définit la vie.

La définition porte donc en germe le contenu d'un programme de recherche « ...s'il en est ainsi, il ne s'agit plus que de savoir en quoi consiste, dans un corps, l'ordre et l'état de ses parties qui le rendent capable de posséder la vie active ». Ce programme d'investigation introduira d'ailleurs la deuxième partie de la Philosophie zoologique :

Considérations sur les causes physiques de la vie, les conditions qu'elle exige pour exister, la force excitatrice de ses mouvements, les facultés qu'elle donne aux corps qui la possèdent, et les résultats de son existence dans ces corps.

L'autonomie de la biologie, ce nom inventé en France par Lamarck²⁵⁷ et en Allemagne par Reinhold Trevinarius (1776-1837)²⁵⁸ se développera dès lors autour de cette recherche par l'étude des caractères communs aux végétaux et aux animaux, et par ce qui les distingue des objets inanimés. Ce dont il sera alors question c'est l'étude des caractères propres de ces êtres vivants sans exception. (Histoire naturelle des animaux sans vertèbres (I, 49-50) et introduction de la Philosophie zoologique.)

Elle tisse comme une communauté d'interrogation entre tous ceux qui recherchent dans l'organisation fine de la matière les déterminants ultimes du vivant,

²⁵⁶ Lamarck Jean-Baptiste, *Philosophie zoologique I*. Déjà cité.

²⁵⁷ Lamarck Jean-Baptiste. (1802) *Hydrogéologie*. Disponible sur : http://www.lamarck.cnrs.fr/ice/ice_book_detail-fr-text-koyre_lamarck-ouvrages_lamarck-8-1.html :

« ...Ainsi toutes ces considérations partagent naturellement la physique terrestre en trois parties essentielles, dont la première doit comprendre la théorie de l'atmosphère, la Météorologie ; la seconde, celle de la croûte externe du globe, l'Hydrogéologie; la troisième enfin, celle des corps vivants, la biologie... »

²⁵⁸ Trévinarius Reinhold. *Biologie : Oder Philosophie der Lebenden Natur für Naturforscher und Aertze*. Disponible sur : http://www.deutschestextarchiv.de/book/show/treviranus_biologie05_1818. Trévinarius écrit un inventaire de la faune et de la flore et fit une synthèse de la nouvelle discipline : la biologie doit envisager les différents phénomènes et formes de la vie, les conditions et les lois qui régissent son existence et les causes qui déterminent son activité.

depuis les tentatives de faire du cytoblastème la source des propriétés vitales,²⁵⁹ jusqu'au rôle fondamental des macromolécules du vivant et de leur organisation en réseaux infra cellulaires.

Pour conclure cette partie, l'organisation comme propriété d'un lieu (cellules, organes, corps...) où se noue les interrogations sur les propriétés élémentaires du vivant, sera pour ainsi dire gravée dans la problématique du vivant à travers l'affirmation de la théorie cellulaire par le biologiste Karl Virchow (1821-1902) : « tout ce qui vit est cellule et (que) toute cellule provient d'une autre cellule ». Et encore : « tout animal apparaît comme la somme d'unités vitales dont chacune porte en elles tous les caractères de la vie ».

2.1.4 Histoire des vivants, histoire du vivant, entre phylogenèse et ontogenèse : des temporalités singulières.

L'histoire du vivant s'inscrit dans deux plans temporels. D'abord celui de sa propre actualisation au monde, son développement, sa perpétuation dans sa descendance, puis également celui qui remonte à son origine lointaine, ultime. Et là, c'est l'histoire non plus d'une filiation sur une période courte mais celle d'une histoire de longue durée, révélatrice de filiations cachées, de parentés perdues, néanmoins essentielles afin de rendre compte d'une unité singulière au-delà de l'extraordinaire diversité des êtres vivants. Et alors s'ouvre la possibilité, parfois scandaleuse pour certains, de fonder l'origine du vivant dans le monde matériel, de nouer les fils de sa trame historique dans un support purement physique. Ce sont donc deux plans historiques, celui courant du « germe » à la formation d'un vivant pour atteindre sa plénitude avant de disparaître, et celui constitué par la longue durée, qui doivent être conjugués pour appréhender le vivant. Sous une forme contestée par la suite, Haeckel résumera la rencontre et l'unification de ces deux plans historiques en

²⁵⁹ Schwann Theodor (1810-1882) : le cytoblastème comme liquide organisable, lieu des changements chimiques inhérents à la vie de la cellule.

énonçant sa loi de récapitulation : « l'ontogenèse récapitule la phylogenèse ».²⁶⁰

Ces deux plans d'interrogations, se sont constitués à travers une longue tradition marquée d'abord par les interrogations sur ce qui différencie le vivant du monde matériel inanimé, avant de s'élargir ensuite à sa phylogenèse. Car au-delà des mythes fondateurs, cette question fera l'objet de réflexions qui témoigneront du souci de fonder chaque vivant dans une histoire qui ne serait plus uniquement celle de son actualisation au monde, mais également celle qui permettrait de retrouver et expliquer les traces de sa filiation et de son articulation avec le monde vivant actuel et passé. C'est finalement définir le vivant comme sujet d'une histoire en articulant sa phylogenèse avec ce qui constitue le propre du vivant.

- ***Reproduction et développement***

Lucrece (De la Nature des choses) affirmait que « rien ne pouvait jamais être créé de rien ». En découle une nécessité logique, celle de semences données qui créent chaque chose : « et donc chacune naît et s'en vient aborder aux rivages du jour à partir de l'endroit où se trouvent ses corps premiers et sa matière... ». Ces semences propres à chaque chose vivante, sont alors comme un ordre de production entraînant le développement des êtres par degrés.

Aristote (De l'âme) pense la génération comme processus permettant d'accéder à l'immortalité de la forme. Par-là, l'être se reproduit semblable à lui-même. Le développement du vivant est décrit comme une épigenèse. L'être en puissance se construit, s'actualise progressivement sous l'action concomitante de la « semence mâle » apportant la forme et coagulant les « sécrétions femelles » sous forme d'un « caillot »,

²⁶⁰ ...illustrée par la comparaison des embryons de vertébrés. Mais les planches présentées par Haeckel montrant les parentés entre stades embryonnaires avaient fait l'objet de retouches et se sont révélées être des « faux ». Haeckel s'en expliqua : « Suite à l'aveu de cette falsification, je devrais me sentir honteux et blâmé. Cependant ma consolation est la suivante : il existe des centaines d'amis se trouvant avec moi sur le banc des accusés, il existe de nombreux observateurs dignes de confiance et de biologistes de grande réputation qui, dans leurs meilleurs livres de biologie, dans leurs thèses ou encore dans leurs revues publient des falsifications semblables aux miennes, des informations douteuses, ainsi que des schémas plus ou moins falsifiés, souvent remis à jour. » Cité par : Hitching Francis, *The Neck of the Giraffe: Where Darwin Went Wrong*, New York : Ticknor and Fields, 1982, p. 204

objet de transformations progressives au cours de l'embryogenèse. Durant ce développement, le cœur joue un rôle essentiel, il se forme au début du processus et est le centre organisateur de l'embryon.

Cette épigenèse se retrouve chez René Descartes.²⁶¹ La dynamique du développement y repose sur la circulation des fluides. Le mélange des semences provoque une fermentation qui induit la chaleur.²⁶² C'est cette chaleur, agitation de particules, qui conduit à la formation des organes, en premier lieu le cœur qui, par le mouvement communiqué aux différentes particules joue le rôle de centre organisateur du développement. Cette embryologie épigénétique mobilise les ressources d'une « chimie » élémentaire et d'une mécanique des fluides : fermentation, agitation de particules, chaleur, circulation du sang, résistances, filtrations. Les organes se forment peu à peu dans le fonctionnement d'un tourbillon de matière pour constituer progressivement le corps. Dans cette dynamique la fonction sera produite par un processus, un flux qui organise et créé ainsi l'organe qui le facilite. L'organe n'est plus l'instrument exerçant une fonction, mais est la condition facilitatrice d'un processus auto organisateur conçu sur un mode mécanique. La formation des organes ainsi que la constitution de l'organisme se réalisent donc à partir des fonctions. Ici, la fonction/circulation précède l'organe. Traitant de l'embryologie, de la génération, la démarche de René Descartes s'affirme donc plus ouverte, plus souple que lorsque l'animal est strictement identifié à la machine. Autant le vivant constitué, actualisé, pouvait être assimilé à une machine, autant dans le processus de génération les choses se devaient d'être posées de manière plus dynamique. Celle-ci repose sur la circulation des fluides qui rend possible une articulation originale du mécanisme et de la génération. Cohabitent donc une physiologie mécaniste, et une embryologie épigénétique, et ce n'est que lorsque le corps sera constitué qu'il relèvera d'une physiologie descriptible en terme mécanique, les organes/outils assurant les fonctions prescrites par le « grand horloger ». Embryologie et physiologie sont finalisées. La première conduit à la formation des organes qui fonctionnent selon les principes de la mécanique et seront descriptibles selon un schème d'utilité/fonctionnement. Finalement

²⁶¹ Descartes René, *La description du corps humain*. Paris. Adam et Tannery, Tome XI, 1909

²⁶² Descartes René, *L'homme* de René Descartes et *la formation du fœtus*. <http://gallica.bnf.fr/>

tout se passe comme si le processus conduisant à la « machine vivante » était sous le contrôle du créateur.

Reste à résoudre le paradoxe de « l'horloge montée » : la permanence d'une forme à travers la succession des générations. Parallèlement aux approches épigénétiques de formation des vivants, comme auto-assemblage de « molécules » organiques, ou constitués sous l'action d'un principe vital, se développeront les théories de la préformation. Dans cette perspective, la vie procèdera d'un germe qui évolue vers un organisme complexe à partir d'êtres préformés, préexistants dans ce germe et organisés sous le même rapport que le vivant formé.

Leibniz reconnaît que concilier l'approche dynamique propre au développement et à la formation d'un ordre qui se maintient et se reproduit a posé un problème aux philosophes. Il introduira alors la préformation comme une nécessité permettant de rendre compte de l'origine des vivants et de leur adéquation en tant que « machine montée » :

Les philosophes ont été fort embarrassés sur l'origine des formes, entéléchies ou âmes ; mais aujourd'hui, lorsqu'on s'est aperçu par des recherches exactes, faites sur les plantes, les insectes et les animaux, que les corps organiques de la nature ne sont jamais produits d'un chaos ou d'une putréfaction, mais toujours par des semences, dans lesquelles il y avait sans doute quelque préformation, on a jugé que non seulement le corps organique y était déjà avant la conception, mais encore une âme dans ce corps, et, en un mot, l'animal même, et que par le moyen de la conception cet animal a été seulement disposé à une grande transformation pour devenir un animal d'une autre espèce. On voit même quelque chose d'approchant hors de la génération, comme lorsque les vers deviennent mouches et que les chenilles deviennent papillons... Ces principes m'ont donné moyen d'expliquer naturellement l'union ou bien la conformité de l'âme et du corps organique. L'âme suit ses propres lois et le corps aussi les siennes, et ils se rencontrent en vertu de l'harmonie préétablie entre toutes les substances, puisqu'elles sont toutes des représentations d'un même univers.²⁶³

Chez Buffon, le concept philosophique de moule intérieur unifie dans une vision corpusculaire, développement et génération. Il s'agit là d'une sorte d'empreinte originaires dans laquelle se couleraient les « molécules organiques ». L'empreinte originaires avait vocation à rendre compte des similitudes et des différences entre individus issus d'une

²⁶³ Leibniz W.G., *Monadologies*.74. Déjà cité.

même parenté. Cependant cette hypothèse sera fortement rejetée sous l'influence de toute une biologie « positiviste ».

Contre les théories de la préformation, Pierre Louis de Maupertuis²⁶⁴ développera une embryologie épigénétique. La construction de l'organisme se fait par assemblage à partir de l'affinité des molécules entre elles. On recourt ici à une chimie du 18^e siècle pensée autour de forces attractives chimiques. Toutes les parties du corps concourent alors à la formation des semences et assurent l'hérédité des caractères acquis. Le fœtus se construit progressivement sous l'effet d'une force essentielle, une *vis essentialis*, qui est une force naturelle et non une âme.

Des éléments de réponses se construiront, partiellement et progressivement à travers le travail des médecins, des physiologistes, théorisant l'épigenèse autour de principes propres de formation du vivant. C'est par exemple le travail du médecin et fondateur de l'embryologie Caspar Friedrich Wolff (1734-1794) qui fonde la rupture avec l'école préformationniste sur des arguments physiologiques, théoriques et de son travail d'expérimentation. En 1768 et 1769, il publie son ouvrage sur l'embryologie, un ouvrage traitant du développement des intestins. Dans *De Formatione Intestinorum*, Wolff évoque pour la première fois les couches germinales dans l'embryon. Cette notion deviendra la conception fondamentale de l'embryologie. Cette théorie a été introduite en montrant que le matériel à partir duquel est fabriqué l'embryon se présente au début du développement, sous forme de couches ayant l'apparence de feuilles. C'était donc la confirmation expérimentale que les organes des animaux apparaissaient progressivement et qu'il était possible d'en suivre les différentes étapes de leur formation.

Sur le plan théorique, ce représentant de l'école vitaliste allemande, évoque une « *vis essentialis* » propre aux organismes vivants transformant la matière inorganique en matière organique, permettant ainsi le développement et l'organisation de l'embryon. Johann Blumenbach (1752-1840), initiateur du vitalisme en Allemagne, complètera

²⁶⁴ de Maupertuis Pierre Louis. *Venus Physique*. 1745. Disponible sur : Gallica.bnf.fr / Bibliothèque Nationale de France.

l'explication en adjoignant à la *vis essentialis* un *nisus formativus*, comme puissance organisatrice spécifique.²⁶⁵ On notera cependant qu'en mettant au fondement de la formation de l'organisation un principe vital d'auto construction on fournit également par là même la raison suffisante des autres principes vitaux. C'est la reprise du thème de la préformation, non plus comme une sorte d'emboîtement à l'infini de structures déjà constituées, mais comme affirmation de la nécessité de germes qui porteraient en puissance les possibilités de formation et de développement de l'organisme. C'est aussi la solution retenue par Kant conjuguant ainsi nécessité, celle d'un ordre de la nature, l'héritabilité de la forme, et contingence de la formation de l'organisme individuel.²⁶⁶

- ***Fixité et évolution.***

La construction de l'unité des vivants au sein de classifications raisonnées au 18^e siècle introduit à l'idée d'un ordre naturel, de structures sous-jacentes à l'ensemble du monde vivant. Mais deux conceptions s'affronteront pour rendre compte de cet ordre naturel ; l'une fixiste, l'ordre donné une fois pour toutes, autorisant certes quelques variations au sein des espèces, mais les conservant telles quelles ; l'autre, faisant fond sur la variabilité des espèces vivantes et partant d'une position plutôt « nominaliste », faisant de l'espèce, de l'ordre, de la famille une construction humaine, introduit la possibilité de filiations entre elles. On rend ainsi possible l'explication d'une différenciation dans les processus de génération et de filiations ainsi que celle d'évolution, de transformation. S'opposent ainsi deux conceptions philosophiques, l'une qui permet d'accéder au projet du créateur ou à défaut à la structure intime de la Nature, l'autre qui témoigne d'un pouvoir créateur du temps ou du moins de la nécessité d'intégrer la dimension historique des processus vivant pour saisir le propre du vivant.

La classification linnéenne réalise l'unification du vivant au sein d'un classement sous tendu par une vision fixiste des espèces. Ce système élaboré par Linné (1707-

²⁶⁵ Blumenbach Johann Friedrich. *Über den Bildungstrieb und das Zeugungsgeschäft*, Göttingen 1780. Disponible sur : http://www.johann-friedrich-blumenbach.de/3_DIGITALISATE.htm.

²⁶⁶ Huneman Ph., « *Naturalising purpose: From comparative anatomy to the 'adventure of reason'* ». Science direct. Stud. Hist. Phil. Biol. & Biomed.Sci.Elsevier, 2006

1778)²⁶⁷, vise ainsi à célébrer la grandeur de la création. Il accrédite auprès des naturalistes l'idée de l'espèce comme unité biologique réelle.

Cuvier (1769-1832) développera également une approche fixiste des espèces. Son travail sur les corrélations anatomiques ne lui permit pas de concevoir le rôle de petites variations localisées comme source d'évolutions structurantes. Il impliquait la stabilité des composantes des espèces afin d'en dégager le plan d'organisation dévolu par la Nature au vivant. C'est son travail sur les enregistrements fossiles qui le conforta dans l'approche fixiste et le conduisit à interpréter les discontinuités comme le produit de catastrophes suivies de créations successives.

A l'opposé, le naturaliste et mathématicien Buffon (1707-1778)²⁶⁸ développa une conception éminemment évolutive de la nature :

Le grand ouvrier de la Nature est le Temps : comme il marche toujours d'un pas égal, uniforme et réglé, il ne fait rien par sauts mais par degrés, par nuances, par succession, il fait tout ; et ces changements, d'abord imperceptibles, deviennent peu-à-peu sensibles, et se marquent enfin par des résultats auxquels on ne peut se méprendre.

On rend ainsi compte de la constitution de l'ordre de la nature et de l'évolution des vivants. Ceux-ci se forment spontanément à partir de germes de vie. Buffon pensait en effet que la nature en était pleine, capables de s'éparpiller lors du pourrissement, puis de s'unir à nouveau pour produire des microbes, des formes primitives de vie.

La « *Naturphilosophie* », développée par Schelling, identifiant système de la Nature et système de la pensée, mettant sur le même plan spéculations et expériences, inscrit les possibilités d'évolution des formes vivantes dans une conception large de l'insertion des formes vivantes dans la Nature. Schelling fait appel au transformisme afin de rendre compte du progrès continu de descendants plus différenciés. Mais c'est conçu comme un déroulement cyclique de phénomènes, une répétition des formes vitales, une réitération de

²⁶⁷ Von Linné Carl. *L'Équilibre de la Nature*. Traduit par B. Jasmin. Paris : Librairie philosophique. J. Vrin, 1972

²⁶⁸ De Buffon Georges-Louis Leclerc. *Histoire Naturelle, Générale et Particulière*. Disponible sur : Edition en ligne : www.buffon.cnrs.fr.

ce qui était, de ce qui est et de ce qui sera. Dans cette perspective, les êtres vivants répondent de façon créative aux changements de l'environnement. Schelling émet l'idée que les développements les plus évolués de la vie sont corrélatifs à des déséquilibres nécessitant de la part des organismes une plus grande conscience de leur environnement immédiat, des réponses plus actives à ce monde et un plus haut niveau de créativité. Dans cet ordre d'idée, les sens deviennent une des composantes essentielles de cette activité créatrice. C'est à partir de ces sens qui confèrent aux organismes une conscience de l'environnement immédiat, que les organismes ont évolué, leur permettant de percevoir à des distances de plus en plus grandes.

Sur un plan matérialiste, le transformisme, dont Lamarck est certainement le représentant le plus marquant, car systématisant l'idée que les espèces vivantes n'étaient pas immuables, inscrit l'ordre vivant dans une généalogie dans laquelle les espèces dérivent les unes des autres. Lamarck en tire un ordre naturel qui pousse les espèces vers une complexité croissante. Dans ce cadre, l'homme constituera l'organisation la plus parfaite. Le transformisme permet ici d'unifier ce qui chez Descartes était séparé : l'embryologie et la vie adulte.

Néanmoins il convient de signaler que le transformisme lamarckien s'inscrit dans une évolution cyclique, une répétition. Au bas de l'échelle des vivants, la « génération directe » selon le terme de Lamarck, constitue une sorte d'alimentation permanente des espèces vivantes en leurs formes les plus primitives avant de se complexifier par la suite sous la pression transformiste.

Il n'y a pas lieu ici de retracer dans le détail le passage du transformisme de type lamarckien à la théorie de l'évolution darwinienne qui constituera la théorisation la plus achevée et la plus opérante dans les sciences de la vie de l'évolution des espèces. Il s'agit d'une théorisation de la descendance avec modification, élaborée et complète, produite sur le mode hypothético déductif, parallèlement par Charles Darwin et Russell Wallace. Elle fournira la charpente théorique de l'histoire de longue durée du vivant. Elle met en perspective la parenté entre vivants, la formation d'une communauté vivante constituée sous l'effet de la durée (longue). En définissant les vivants comme objets reliés les uns aux autres par des liens de parentés elle introduit également à l'idée d'une communauté écologique et met en valeur la vie comme un réseau temporel et spatial entre vivants. Haeckel en inventant le terme d'écologie en 1866 fera fond sur l'inscription de ce réseau vivant dans son interaction avec le milieu environnant.

Cette théorisation de l'évolution à travers un ensemble de mécanismes non finalisés : descendance avec modification, avantage sélectif conféré au porteur d'une modification avantageuse et limitation des ressources naturelles, sera complétée par un travail de modélisation de l'hérédité des caractères acquis, déjà présent dans « L'origine des espèces », à travers la théorie de la pangenèse²⁶⁹. C'était la réponse apportée par Darwin à l'interrogation relative au mécanisme de « mémorisation » des traits avantageux. Ces deux théories seront proposées simultanément à partir de 1882.

Par la suite, August Weismann (1834-1914) fondait la théorie de l'hérédité sur la continuité du plasma germinatif (le germen). Elle explique l'hérédité par la continuité d'une substance qui se transmettrait inchangée de génération en génération, et qui déterminerait la formation du corps (le soma). La distinction centrale introduite par cette théorie entre germen et soma, c'est-à-dire entre support de l'hérédité et développement organique, sera déterminante dans l'histoire de la biologie. Elle débouchera sur une séparation entre les recherches sur l'hérédité et les recherches sur le développement de l'organisme. Avant Weismann, l'étude de l'hérédité était indissociable de l'étude de l'ontogenèse (embryogenèse et croissance individuelle). On pensait que pour comprendre la transmission des caractères à la descendance, il fallait d'abord comprendre leur formation concrète dans l'organisme. Or, avec la distinction entre germen et soma, Weismann justifiait théoriquement la séparation entre l'étude du «support» de l'hérédité (le plasma germinatif) et l'étude du développement des caractères déterminés par cette hérédité (le plasma somatique).

Selon Weismann il est impossible pour un organisme de transmettre à sa descendance les caractères acquis au cours de sa vie. En rejetant radicalement sur des bases expérimentales et théoriques l'hérédité des caractères acquis, il jetait alors les fondements de ce qui au début du 20^e siècle constituera le néodarwinisme.

D'une certaine manière les prolongements de la théorie weismannienne

²⁶⁹ Darwin Charles. *La variation des animaux et des plantes sous l'effet de la domestication : chapitre 27 « Hypothèse provisoire de la pan genèse »*. Presses Pocket, Collection Agora, Les classiques : 1990

conduiront, temporairement, à scinder deux perspectives temporelles, celle présidant au développement et celle rendant compte de l'évolution des espèces.

2.2 Saisir le vivant : les schèmes d'intelligibilité.

La quête du propre du vivant, affirmée ou seulement suggérée, mobilise différentes matrices d'explications qui inscrivent un ensemble de faits liés à la phénoménologie des vivants, parfois seulement de l'homme, dans un système d'intelligibilité destiné à en rendre raison. Ces schèmes d'intelligibilité sont marqués par le poids de l'histoire de la pensée mais aussi par la nature particulière de l'objet auquel ils s'appliquent. Car si on peut identifier des styles d'explications qui empruntent aux mêmes formes explicatives, c'est également l'objet d'interrogation lui-même qui, ici, impose une nécessaire récursivité de ce qu'on saisit par la pensée sur la façon dont on se donne l'objet de cet effort.

Le parcours rapide avec comme fil conducteur la recherche du propre du vivant a mis au-devant de la scène d'exposition, des épistémologies multiformes. On caractérise le vivant sur un mode essentiel en questionnant son être, on le décrit sur un mode phénoménologique en appréciant la diversité des façons par lesquelles il se donne à la connaissance humaine informée, on l'expérimente sur un mode empirique par la collecte, l'étude, la mise en forme d'observations. Ce sont finalement différentes manières d'aborder la compréhension du vivant pour en retour, constituer ce qui rend possible la restitution de sa diversité au sein d'ordres sous-jacents et son intégration au sein de la communauté vivante.

C'est donc une lecture un peu différente que nous souhaitons effectuer autour de quelques points d'investigations et d'interrogations. Ce sera ainsi la constitution même du règne du vivant, l'affirmation de son unité à travers son histoire naturelle qui constituera le point de départ de ces réflexions. On est alors conduit naturellement à examiner le statut de l'observation, le passage de l'expérience à l'expérimentation. S'en suit un questionnement sur le thème de la décomposition et de la réduction du vivant avec son corollaire, le mécanisme et l'analogie machiniste pour finir sur une interrogation : comment penser le passage de l'ordre minéral à l'ordre vivant ?

2.2.1 Constitution de l'ordre du vivant. L'unité du vivant à travers l'histoire naturelle

- *Point de repère : l'unité du monde des vivants autour du propre du vivant*

De manière complexe, voire contradictoire, l'unité des vivants autour d'une propriété commune, la vie, s'est constituée en opposition à la mort, à la non vie. La vie s'inscrit dans une constante tension, la mort comme absence de vie, la vie en sursis de la mort. L'opposition vie non vie est alors au fondement d'un schème de compréhension du monde à la fois synchronique et diachronique, opposant êtres vivants et non vivants, vie et mort de l'organisme. Ce fil conducteur détermine la quête du propre de la vie autour du couple animé/inanimé. La recherche de ce qui constitue dès lors le propre du vivant, de l'animé, nourrira toute une série de pensées philosophiques, naturalistes, physiologiques, abordées précédemment.

L'accession à une pensée du propre du vivant, la vie comme propriété commune de tous les êtres vivants, a pu dans un premier temps se constituer en référence à l'Homme, comme si ici également il restait la « mesure de toute chose ».²⁷⁰ Au sommet de la création, aboutissement le plus achevé des vivants il en constituera l'étalon universel, les autres vivants n'étant que des vivants dégradés.

Dans l'ordre vivant, l'homme en constitue donc l'archétype. Et les vivants ce seront les objets du monde qui possèdent une âme, une puissance d'engendrement associée à un corps, combinaison de terre, d'eau, d'air et de feu. Cette unité s'est construite en mettant l'Homme au centre de ce monde, comme son parachèvement. Pour reprendre Galien, l'homme est l'accomplissement de l'animal et c'est ce qui ordonne le vivant mais ouvre également la possibilité de connaître ce parachèvement.

On esquissait ainsi la voie à l'étude des rapports d'analogies entre vivants. Ceux entre l'homme et l'animal qui, ordonnés par ces principes, livrera une ouverture vers

²⁷⁰ Protagoras, cité par Platon dans le Théétète.

l'anatomie comparée ainsi qu'aux filiations entre animaux. Mais par-là, on rejoignait également une longue tradition remontant à l'Antiquité, défendant l'existence d'une « Échelle des Êtres », c'est-à-dire l'établissement d'une hiérarchie dans la représentation des objets naturels, dont les organismes vivants, selon une complexité croissante. En bas de l'échelle figuraient les quatre éléments, puis les minéraux suivis des végétaux ; les animaux étaient rangés selon leur plus ou moins grande ressemblance avec l'Homme : vers, poissons, amphibiens et reptiles, oiseaux et mammifères. L'Homme était bien évidemment au plus haut de cette échelle des êtres matériels. Au 18^e siècle, Gottfried Leibniz (1646 - 1718) popularisera cette échelle des êtres qui sera reprise par Charles Bonnet (1720 - 1793)²⁷¹ en biologie. Deux conceptions interféreront alors, celle de l'Échelle des Êtres et celle de la Classification Naturelle.

Dans une perspective hylémorphique, l'enquête naturaliste d'Aristote conduit à penser l'unité du monde vivant, du monde animé autour d'une substance propre : l'âme, dont les déclinaisons permettent de jeter les fondements de la hiérarchie des vivants, à la fois unis autour d'un principe commun et différencié selon son mode d'expression en plantes, animaux et humains. Ces critères de différenciation, l'âme nutritive des plantes, complétée par l'âme sensitive des animaux, sont donc ordonnés selon un principe de consécution. Ils constituent le principe d'unification du vivant, et livrent les fondements de sa taxinomie.

Au sein de ces grandes catégories (ordres du vivant), ce seront les analogies qui serviront de fil conducteur pour opérer des regroupements plus fins. Théophraste (-372 - 288) poursuit dans « L'histoire des plantes » et « Les causes des Plantes » l'investigation aristotélicienne. Ces regroupements destinés à restituer une synthèse ordonnée des vastes descriptions, répartissent les végétaux en quatre groupes selon leur forme générale et leur utilité pour l'homme. Cet élève d'Aristote distinguait ainsi les arbres, les arbustes, les plantes médicinales, les plantes vénéneuses. Cette classification est enrichie par le médecin militaire Dioscoridex (40-90 environs après J.C.) dans le *De materia medica* par la

²⁷¹ Victor Antoine duc de Caramon. *Charles Bonnet, philosophe et naturaliste*. Sa vie et ses œuvres. Paris : A.Vaton, 1859

description de plus de six cents espèces de botanique médicale. Elle perdurera jusqu'à la Renaissance et sur certains points continuera à faire autorité jusqu'au 17^e siècle.

Mais c'est également en référence constante à la variété de la chose naturelle, que l'enquête naturaliste de la phénoménologie du monde, mise en poème par Lucrèce posait l'unité du monde vivant dans le cadre d'une approche radicalement différente.²⁷² En référence à une métaphysique nourrie de philosophie épicurienne, Lucrèce conçoit le monde autour d'une vision atomistique lui conférant son unité au-delà du foisonnement des perceptions phénoménologiques. Le vivant s'insère alors dans les productions générales de la Nature dont il ne diffère plus radicalement. Au sein de ce monde, la vie est pensée comme un regroupement d'atomes parmi d'autres. Les vivants, humains et animaux sont pensés sur un pied d'égalité. C'est l'union d'atomes « communs » qui constitue les êtres vivants. La sphère du vivant est intégrée dans les productions générales de la Nature et le vivant n'est plus pensé à rebours de la mort : « c'est...rendre claire la nature de l'âme ainsi que de l'esprit, et c'est jeter dehors la tête la première cette fameuse peur de l'Achéron... » (De la Nature des choses, III, 22-44). Ici le propre du vivant n'est plus qu'une qualité seconde.

- ***Vers un ordre biologique.***

Jusqu'à la Renaissance on vivait pour ainsi dire sur l'acquis botanique de Théophraste alors que la zoologie se cantonnait dans une description de singularités. Le naturaliste Suisse, Konrad Gessner (1516-1565) dans l'« *Historia Animalium* » emprunte ces deux voies pour livrer la vue d'ensemble du monde vivant : celle d'une botanique classificatrice et d'une zoologie descriptive. Sa classification reprend, pour l'essentiel des catégories populaires. Gessner, ne sachant établir de classification cohérente opte d'ailleurs pour un ordre de présentation alphabétique. Ses descriptions zoologiques mélangent des observations directes, personnelles avec celles tirées d'ouvrages d'auteurs contemporains ou passés. Elles se plaisent à la description de singularités, voire de créatures mythiques dont l'existence est mise sur le même plan que celui d'animaux de

²⁷² Lucrèce. *De la Nature des choses*. II, 22-44. Le livre de poche. Collection : Classiques de poche. Paris, 2002.

continents en cours d'explorations.

De multiples tentatives, les unes basées sur la morphologie des feuilles ou des racines, d'autres sur la structure des fleurs, d'autres encore sur la nature des graines ou des fruits sont entreprises et permettent de retrouver les grandes familles de la botanique.

Le végétal, comme « vivant immobile et passif » pour reprendre les termes de Georges Canguilhem, servira de modèle aux taxinomies qui se sont développées tout au long des 17^e et 18^e siècles :

...C'est en prenant les animaux pour objet qu'Aristote a fixé pour longtemps les règles de la classification des êtres vivants, il se trouve que, depuis la Renaissance, la classification a d'abord été l'occupation active des botanistes. De Tournefort à Linné, c'est la botanique qui a fourni à la zoologie des modèles pour la taxinomie²⁷³

Ce paysage, composite, impressionniste sera en pleine transformation entre la Renaissance et l'âge classique pour aboutir à un système de description unifiant botanique et zoologie au sein d'une classification raisonnée. Il convient bien évidemment de citer les travaux du naturaliste Suédois Carl Von Linné²⁷⁴(1707-1778) dont le travail de recension des espèces, l'invention de la nomenclature binomiale (chaque espèce est désignée par un nom générique commun à plusieurs espèces et un nom spécifique propre à l'espèce) a unifié le vivant (les espèces vivantes) au sein d'une même classification. Mais l'affirmation par Linné que l'ordre révélé, ou entrevu dans sa tentative de classification, renvoyait à une Classification Naturelle, une classification unique, manifestation de l'« Ordre de la Nature », celui de la Création divine, sera vigoureusement combattue par des naturalistes et philosophes comme Julien Offray de la Mettrie, Buffon et Diderot.

La construction de l'unification du vivant autour d'une conception commune et unifiée de la vie semble avoir emprunté deux voies. L'une autour de sa description ordonnée, structurée, et qui partait dès lors d'un principe de vie comme donnée brute d'expérience et l'autre, plus théorique, plus fondationnelle, élaborait cette unité en partant

²⁷³ Canguilhem Georges. *Etudes d'histoire et de philosophie des sciences concernant les vivants et la vie*. Chap.III : Investigations. Paris : Librairie philosophique J.Vrin, Problèmes et controverses, 2002

²⁷⁴ Von Linné Carl. *Systema Naturae*. Déjà cité.

de préconceptions métaphysiques dont les racines remontaient à l'Antiquité: la vie relevant d'un mode spécifique d'organisation de la matière ; la vie procédant d'un principe extra physique.

La difficulté pour unifier la vie dans un concept unique, une description commune, reflète le constat lockien d'une difficulté à aller au-delà du sens commun de la vie :

Il n'y a point de terme plus commun que celui de vie, et il se trouverait peu de gens qui ne prissent pour un affront qu'on leur demande ce qu'ils entendent par ce mot ...Cependant l'idée vague qu'ils en peuvent avoir ne suffit pas lorsqu'il s'agit de savoir si une plante qui est déjà formée dans la semence, a la vie, ou un homme sans défaillance, sans courage ni mouvement... ²⁷⁵

Ce constat fait écho à l'affirmation de Michel Foucault qu'au 18^e siècle la vie n'existait pas, car « existait seulement des êtres vivants (apparaissant) à travers une grille du savoir constitué par l'histoire naturelle ». ²⁷⁶

Mais n'était-ce pas aussi cette confrontation de l'esprit scientifique à la diversité des formes vivantes, à l'effort répété et continu pour la domestiquer en l'ordonnant, à l'espoir et la volonté d'en saisir son unité profonde, qui a conduit à l'invention et la constitution de la biologie comme science d'un ordre naturel particulier ?

A la fin du 18^e siècle, l'unité du monde vivant est affirmée et théorisée par Lamarck autour de principes fondant les caractères communs aux végétaux et aux animaux pour les distinguer des objets inanimés. L'auteur de la Philosophie Zoologique, introduit une bipartition du monde entre corps organisés, vivants et corps bruts sur fond de leur unité matérielle. Pour Jean Baptiste Lamarck il existe entre ces deux ordres un « hiatus immense qui ne permet pas de ranger sur une même ligne ces deux sortes de corps, ni d'entreprendre de les lier par aucune nuance ; ce qu'on a vainement tenté de faire ». Ce hiatus est néanmoins pensé dans un cadre matérialiste.

²⁷⁵ Locke. *Essais philosophiques concernant l'entendement humain*. Paris : Vrin. Bibliothèque des textes philosophiques, 2001

²⁷⁶ Foucault Michel. *Les mots et les choses. Une archéologie des sciences humaines*. Chap.V : Classer. Paris : Gallimard, Collection Tel., 1996

La biologie encore naissante au début du 19^e siècle, peut alors revendiquer l'unité des phénomènes vivants. Cette unité profonde des « phénomènes vivants, communs aux animaux et aux végétaux »²⁷⁷ sera l'un des objets de la recherche constante de la biologie du 19^e siècle et s'attestera cette fois-ci non plus dans une phénoménalité apparente (animé versus non animé) mais dans l'exploration de l'intimité à chaque fois plus affinée du vivant. C'est ainsi, par exemple, que Claude Bernard pourra affirmer, contre les théories (Bousingault, Liebig et Huxley, Tyndall en Allemagne) qui distribuaient les facteurs vitaux entre les êtres chargés de la synthèse organique (les végétaux), et ceux chargés de la combustion ou analyse organique (les animaux), leur unicité dans la totalité de l'ordre vivant.

- ***L'unité et sa déclinaison au sein du vivant diversifié.***

Comprendre, c'est-à-dire saisir l'intégralité de ce qui fait la spécificité du vivant, le connaître dans les modalités variées et changeantes de son fonctionnement, relève tout à la fois d'une démarche d'enquête (Aristote), et de la recherche et la mobilisation de principes d'intelligibilité. L'Histoire Naturelle, faite de description et de caractérisation d'objets de la nature, qualifiés, caractérisés, nommés et définis comme vivants, s'articule donc autour d'une vision unifiée et unifiante des êtres organisés, rendant possible leur compréhension ainsi que la mise en œuvre d'un procès de connaissance qui, tel le déploiement de poupées russes, a permis de déplier les différents niveaux de leur organisation pour en révéler la structure la plus intime, celle qui met en jeu les composants atomiques élémentaires de la matière organique.

L'unité structurée du vivant s'est constituée à travers son Histoire Naturelle, la description des objets de la Nature. C'est cette même démarche qui a rendu possible la mise en place d'un programme d'investigation et de mise en ordre de cette fraction du monde.

²⁷⁷ Bernard Claude. *Leçon sur les phénomènes de la vie communs aux animaux et aux végétaux*. Déjà cité.

Aristote pouvait ainsi affirmer :

[...] Par conséquent, pour chaque classe d'êtres, il faut rechercher quelle espèce d'âme lui appartient, quelle est, par exemple, l'âme de la plante, et celle de l'homme ou celle de l'animal. — Mais par quelle raison expliquer une consécution de ce genre dans les âmes : c'est ce qu'il faudra examiner. Sans l'âme nutritive, en effet, il n'y a pas d'âme sensitive, tandis que, chez les plantes, l'âme nutritive existe séparément de l'âme sensitive. De même encore, sans le toucher, aucun autre sens n'existe, tandis que le toucher existe sans les autres sens, car beaucoup d'animaux ne possèdent ni la vue, ni l'ouïe, ni la sensation de l'odeur. En outre, parmi les êtres sentant, les uns possèdent la faculté de locomotion, et les autres ne l'ont pas...²⁷⁸

Ce qui est visé, c'est non seulement une description mais la mise en évidence des principes d'organisation commune.

Ainsi Aristote dans « L'Histoire des Animaux » développe tout un projet comparatif allant au-delà des simples descriptions. Dans « Les Parties des Animaux » il tente de mettre en lumière leurs différences et ressemblances fonctionnelles²⁷⁹. C'est l'exploitation du principe d'unité du monde vivant au service de la connaissance de l'Homme :

... Et si quelqu'un trouvait méprisable l'étude des autres animaux, il lui faudrait aussi se mépriser lui-même, car ce n'est pas sans avoir à vaincre une grande répugnance qu'on peut saisir de quoi se compose le genre Homme, sang, chair, os, veines, et autres parties comme celles-là. (Les Parties des Animaux)

L'unité du monde du vivant permet de saisir l'organisation de classes de vivants particuliers aux moyens de comparaisons, de recherches d'analogies et d'homologies. Pour reprendre une affirmation de Buffon « sans les animaux, la nature de l'homme serait incompréhensible »²⁸⁰. Dans cette perspective l'unité du monde vivant sera théorisée par le fondateur de la paléontologie moderne et de l'anatomie comparée, Georges Cuvier. À partir de là, s'élaborera une classification « naturelle », dans laquelle l'Homme perd la place de point focal de l'échelle des Êtres. Cette classification se manifeste à travers le jeu de correspondance des parties et la loi de subordination des organes. Cette loi exprime le fait

²⁷⁸ Aristote. *De l'Âme*, II, 3, 414a-415a tr. Fr. Tricot, éd. Vrin

²⁷⁹ Lefebvre René. *Aristote zoologue*. Archives de Philosophie, 1998, 61

²⁸⁰ De Buffon Georges-Louis Leclerc, *Histoire naturelle générale et particulière. Tome IV : Discours sur la nature des animaux*. Edition en ligne : www.buffon.cnrs.fr.

que les organes agissent et réagissent les uns sur les autres, et coopèrent à une action commune. Elle est au fondement de la comparaison des êtres vivants à travers leur organisation interne et de l'élaboration d'une classification « naturelle ». Et le principe de corrélation des organes, pendant trans-espèce de la loi de subordination, énonce que chaque partie d'un animal peut être déterminée par chaque autre et toutes par une seule. Il permet à Cuvier de reconstituer un animal à partir d'un de ses fragments. Mais rappelons que ses travaux lui font émettre à rebours des théories transformistes, l'hypothèse d'espèces animales figées, certaines ayant alors pu être entièrement détruites et perdues après des catastrophes naturelles.

L'unité du monde vivant se révèle et se constitue également dans l'unité anatomique fine, profonde, au-delà de la variété des tissus qui constituent les êtres vivants et qui diffèrent entre règnes, ordres, et espèces. C'est ainsi que l'on retrouve l'unité d'organisation avec la théorie cellulaire développée par Théodore Schwann (1839) et Scheiden. La cellule est l'élément anatomique, l'organisme morphologique le plus simple. Elle constitue tout l'organisme et est le premier représentant de la vie.

La théorie cellulaire a été exposée dans sa radicalité la plus affirmée par Rudolf Virchow (1821-1902) : « tout ce qui vit est cellule et ... toute cellule provient toujours d'une autre cellule ». ²⁸¹En réfutant la théorie du cytoblastème (substance pouvant donner naissance à de nouvelles cellules) elle livre une géométrie unifiée du vivant, le cadre unique dans lequel s'exprimera l'unité du monde vivant. Elle renouvelle les interrogations relatives à la localisation d'un principe vital, car c'est finalement dans le cadre d'un maillage organisationnel commun à tous les êtres vivants que s'analyseront les processus vitaux et s'affirmera leur unité.

L'unification des processus avait été amorcée par Lavoisier (1743-1794) démontrant que les processus de synthèse et de destruction vitale se retrouvent dans les règnes animaux et végétaux. Priestley (1733-1804) notait que les végétaux « purifiaient l'air que les animaux ont vicié et semblaient se comporter, quant à leur respiration en sens

²⁸¹ Virchow Rudolf. *Pathologie cellulaire*, ch. I, 1849

inverse ». ²⁸²Cet antagonisme apparent entre la respiration des animaux et celle des plantes sera finalement rejeté par Claude Bernard montrant que destruction et création vitale s'appliquaient à l'ensemble des êtres vivants (Phénomènes de la vie communs aux animaux et aux plantes). Ce sont les mêmes phénomènes vitaux qui se manifestent dans les plantes et dans l'animal. Ils sont partout accompagnés de phénomènes de nutrition qui sont une combinaison de destruction et de création vitale (Catabolisme et anabolisme), ils constituent l'universalité du vivant.

Chez Huxley (1825-1895) ²⁸³le protoplasma (le constituant indifférencié de la cellule) constituait la « base physique de la vie ». Il est commun aux animaux et végétaux, et est support et lieu de distribution de molécules. La vie sera conférée à une constitution spécifique de cette matière de base au sein de la cellule qui devient alors la première forme déterminée de la vie, le moule renfermant la matière vivante. Cette cellule est appréhendée comme un être vivant rudimentaire dans lequel le proto plasma, la substance vivante comme constituant, devient l'agent vital de ses manifestations. La constitution physique de ce protoplasma fera l'objet de spéculations variées. Ainsi Haeckel (1834-1919) évoquera des monères associant propriétés physiques de molécules matérielles et propriété vitale. Ces composantes ultimes ont la faculté de conservation du mouvement par lequel se manifeste l'activité des molécules. Claude Bernard, dans ses commentaires sur les travaux de Haeckel avait noté la proximité de cette hypothèse avec celle avancée par Maupertuis dans la *Vénus Physiologique* (1759) relative aux propriétés élémentaires des particules organiques.

L'unité phénoménologique du vivant se décline dès lors sur tous les plans : celui des processus, dans lesquels les phénomènes vitaux sont décentralisés au niveau de l'intime du vivant, mais aussi celui de la matière sous forme de substance vivante, la masse protoplasmique dont parle Claude Bernard, et enfin sur celui de la forme et de l'organisation avec la cellule comme maille organisationnelle universelle.

²⁸²« Expériences sur les airs » de Priestley, cité par Claude Bernard dans « leçons sur les phénomènes de la vie communs aux animaux et aux végétaux.

²⁸³ Huxley Thomas Henry. *On the physical basis of life*. 1868. Disponible sur : <http://aleph0.clarku.edu/huxley/CE1/PhysB.html>.

Voir également : *Les sciences naturelles et le problème qu'elles font surgir*. Paris :1877. Disponible sur Gallica.

2.2.2 De l'expérience à l'expérimentation.

La révolution scientifique, dont l'une des conséquences sera l'affirmation de l'unité épistémologique du monde « supra lunaire » (seul accessible à la connaissance scientifique chez les Anciens) et du monde « infra lunaire » (justiciable de seules descriptions), a ouvert des perspectives renouvelées de connaissance, y compris de celle du vivant.

Le paradigme de cette science naissante est illustré par la démarche d'Harvey (1578-1657). Dans la compréhension de la circulation sanguine, le rejet des théories anciennes galéniques (passage de l'air par la veine pulmonaire) et l'expérimentation jouent un rôle essentiel. La démonstration expérimentale repose sur le recours aux ligatures et à la référence au mouvement circulaire. La théorisation qui en organise l'intelligibilité conduit Harvey à affirmer que les esprits animaux ne sont pas distincts du sang. Si comme dans la pensée antique, le mouvement du sang définit la vie, ce qui importe ici, c'est que l'expérimentation, entendue comme l'observation d'une situation créée pour les besoins de vérification d'une hypothèse, prend à rebours toute une tradition physiologique tournée vers les seuls commentaires des travaux de Galien. Les quelques éléments de controverses exposés ci-après permettent de prendre la mesure du choc créé par le primat de l'expérimentation sur le commentaire. Ainsi à Paris, Riolan professeur d'anatomie à la Faculté de médecine, Gui Patins doyen, traitent Harvey de « circulateur », de charlatan. (« *circulator* » signifiant en latin charlatan). Ce qui était affirmé a priori, c'est que « la circulation est paradoxale, inutile à la médecine, fausse, impossible, inintelligible, absurde et nuisible à la vie de l'homme » car contraire à l'enseignement de la tradition. Et Patins défenseur de la tradition écrira: « Je préfère me tromper avec Galien que de suivre dans sa circulation, un charlatan comme Harvey. »²⁸⁴

Théorisation et expérimentation se conjuguent, l'une pour assurer l'intelligibilité de l'autre, celle-ci pour attester de la pertinence de la première.

C'est également en tant qu'homme de laboratoire, expérimentateur, que Van

²⁸⁴ Bitbol-Hespériès Annie. *Le principe de vie chez Descartes*. Paris : Librairie philosophique J.Vrin, 1990

Helmont (1579-1644) rejettera la scolastique aristotélicienne car: « ... les œuvres de la nature s'apprennent et se mesurent en distillant, arrosant, séchant, calcinant, résolvant..... ».²⁸⁵

C'est l'expérimentation, procédant essentiellement de la pratique médicale, qui peut devenir source de connaissance selon Julien Offroy de la Mettrie (1709-1751) :

L'expérience et l'observation doivent donc seules nous guider ici. Elles se trouvent sans nombre dans les Fastes des Médecins, qui ont été Philosophes, et non dans les Philosophes, qui n'ont pas été Médecins. Ceux-ci ont parcouru, ont éclairé le Labyrinthe de l'Homme; ils nous ont seuls dévoilé ces ressorts cachés sous des enveloppes, qui dérobent à nos yeux tant de merveilles. Eux seuls, contemplant tranquillement notre Ame, l'ont mille fois surprise, et dans sa misère, et dans sa grandeur, sans plus la mépriser dans l'un de ces états, que l'admirer dans l'autre. Encore une fois, voilà les seuls Physiciens qui aient droit de parler ici. Que nous diraient les autres, et surtout les Théologiens? N'est-il pas ridicule de les entendre décider sans pudeur, sur un sujet qu'ils n'ont point été à portée de connoître, dont ils ont été au contraire entièrement détournés par des Etudes obscures, qui les ont conduits à mille préjugés, et pour tout dire en un mot, au Fanatisme, qui ajoute encore à leur ignorance dans le Mécanisme des Corps?²⁸⁶

Et c'est encore l'expérimentation, revendiquée par le médecin, physiologiste, naturaliste Suisse, Albrecht Von Haller (1708-1777) qui sera chargée de montrer les limites du mécanisme et qui justifiera le recours au vitalisme. Haller expliquait :

...j'ai appliqué un instrument de mathématique divisé en très petites parties le long d'un long nerf d'un chien vivant, de façon qu'il me fit apercevoir les plus petites contractions dans cet état, j'ai irrité le nerf, il est resté parfaitement immobile. Autre preuve de cette dissociation il suffit de lier fortement ou même de couper le nerf de son muscle. Ce dernier n'en conserve pas moins une contractilité qu'on peut provoquer facilement.

Le physiologiste séparera ainsi nettement l'élasticité-rétractilité comme caractère proprement physique d'action de l'irritabilité qui habite les seuls muscles de la sensibilité et qui relève d'un principe différent :

J'appelle partie irritable du corps humain celle qui devient plus courte quand quelques corps étrangers la touchent un peu fortement ...Quant à la sensibilité, d'abord elle suppose les filets nerveux, le pouvoir de transmettre à distance, mais ces éléments eux-mêmes ne se livrent jamais à l'agitation précédemment signalée, à

²⁸⁵ In Pichot André : *Histoire de la notion de vie. Avant Descartes. La critique de la scolastique aristotélicienne.*

²⁸⁶ de la Mettrie Julien Offroy, *L'homme machine.* Edition de 1865. Disponible sur : <http://galica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k6253039v>

tel point que les parties les plus irritables ne sont point sensibles et que les plus sensibles ne sont point irritables.

L'expérimentation permet ici d'affiner la compréhension du fonctionnement des organes, séparant l'élasticité et l'irritabilité, séparant le musculaire du cellulaire et du nerveux. C'est donc au nom de ses observations que le savant défend une nouvelle géographie corporelle. Elles seront reprises et orchestrées par les biologistes et les essayistes français. Le corps enferme en lui des qualités spécifiques, généralisées et défensives, une réactivité.²⁸⁷

Une place majeure d'un mouvement qui mène de l'expérience, celle du médecin, du physiologiste, à l'expérimentation notamment animale est bien évidemment occupée par Claude Bernard. Sa démarche expérimentale se veut en rupture avec l'anatomie comparée.

Quelques éléments du débat. D'un côté un positivisme, proche de celui exposé par Auguste Comte, développé par le zoologiste et anatomiste Blainville (1777-1850) pour qui l'anatomie comparée devait être le substitut de l'expérimentation. On est en cela en pleine cohérence avec l'enseignement de Cuvier de rejet de la recherche analytique de phénomènes simples par l'étude des animaux, au motif que cette recherche nécessiterait d'altérer l'essence d'un organisme fonctionnant comme un tout :

Toutes les parties d'un corps vivant sont liées ; elles ne peuvent agir qu'autant qu'elles agissent toutes ensemble : vouloir en séparer une de la masse, c'est la reporter dans l'ordre des substances mortes, c'est en changer entièrement l'essence.²⁸⁸

Et de l'autre, la position de Claude Bernard, fondatrice : comprendre le vivant c'est aller au-delà de l'anatomie comparée. Même si pour Claude Bernard celle-ci reste la condition de possibilité d'une physiologie générale, ce qui importait, c'était de passer de la médecine d'observation, de la tradition hippocratique de l'étude du milieu extérieur, à une médecine expérimentale rendue possible par la théorie du milieu intérieur. Il s'agit d'une

²⁸⁷ Dagognet F., Réflexions épistémologiques sur la vie et le vivant. www.Philagora.net/epistemol/

²⁸⁸ Lettre à J. C. Mertrud, p. 5. An VIII. Cité dans Claude Bernard : « Introduction à la médecine expérimentale ».

expérimentation active fondée sur la vivisection, l'analyse du vivant en pleine vie. La théorie du milieu intérieur rend possible l'emploi à des fins d'expérience des animaux les plus élevés dans l'échelle vivante, car

...les animaux élevés sont plus simples parce que la différenciation des phénomènes vitaux est poussée plus loin, donc plus simple à étudier contrairement aux animaux simples dans lequel les phénomènes « sont plus confus, moins exprimés et plus difficiles à distinguer.²⁸⁹

En somme, si les lois de la mécanique classique s'étudient sur des machines simples, celles de la physiologie s'étudieraient (mieux) sur des corps complexes.²⁹⁰

Ce primat de l'expérience, de l'expérimentation semble également clore définitivement, le besoin ou la nécessité du recours à une définition. Pour Claude Bernard il n'y a pas (plus) lieu de définir la vie. Car dans les sciences de la vie il ne peut y avoir de définition a priori, de définition absolue. Toute tentative de définition ne traduit finalement qu'une hypothèse et la définition comme fin, comme terme idéal reste inaccessible : « La physiologie est une science expérimentale et n'a pas à donner des définitions a priori. » (Leçon sur les phénomènes de la vie...)

Claude Bernard s'opposera également aux principes de la Philosophie de la Nature, philosophie *a priori*, qu'il considère contraire aux principes de la démarche expérimentale dont il est l'ardent promoteur.

Le rôle central de l'expérimentation comme moment où le physiologiste, le biologiste, se tourne vers le vivant pour l'interroger, le soumettre à ses interrogations, le manipuler pour conforter ses hypothèses, ouvre la voie au recours à toute une famille de « vivants référents », des animaux de laboratoire comme modèles vivants. Il en découle une interrogation : le rôle essentiel conféré à l'expérimentation, certes éclairée et mise en perspective par l'activité théorique de l'expérimentateur, ne conduit-il pas à cantonner les sciences de la vie à un positivisme étroit s'interdisant par exemple de rechercher une

²⁸⁹ Bernard Claude. *Leçons sur la médecine expérimentale*. Déjà cité.

²⁹⁰ Canguilhem Georges. *Etudes d'Histoire et de Philosophie des sciences concernant les vivants et la vie*. Paris : Librairie philosophique J.Vrin, Problèmes et controverses, 2002

définition qui ne soit autre chose que la liste des caractéristiques communes identifiées chez les êtres vivants ?²⁹¹ On laisserait donc les interrogations relatives à la nature du vivant aux philosophes, aux métaphysiciens.

2.2.3 Connaître le vivant à travers sa décomposition.

Comment comprendre le jeu, les rapports entre les parties organisées avec le tout de l'organisme ? C'est évidemment l'enjeu de toutes les démarches d'observations, d'études comparatives, d'expérimentations aux fins d'analyse du vivant organisé. N'est-ce pas une des tâches de la physiologie :

... cette partie de la médecine qui pénétrant dans la structure intime des parties du corps, y cherche par quelles lois l'homme se forme, se développe, croît, vit, reproduit son semblable, dépérit et meurt ? (Condorcet- Haller) ?

Ce qui finalement est en jeu, c'est l'articulation entre physiologie générale qui traite de manière philosophique et abstraite des phénomènes de la vie, et la physiologie spéciale qui, prenant pour sujet d'études une espèce vivante distincte, décrit le mécanisme de la vie dans cette seule espèce. Et si l'étude des parties, de leur finalité chez les animaux organisés nourrit tout un jeu de correspondances, d'analogies entre espèces, il importe également d'accéder à la compréhension de ce qui les lie au tout de l'organisme.

Aristote dans « Les parties des animaux » partait de l'essence des choses, la « substance intégrale » pour rendre compte du rôle et de la place des parties :

De même, quand on traite d'une partie ou d'un organe quelconque, il faut garder dans l'esprit qu'on ne doit pas seulement faire mention de la matière et voir là le but de la recherche, mais qu'on doit s'attacher à la forme totale ; ainsi considère-t-on une maison toute entière et non pas seulement les briques, le mortier, les bois. Pareillement, dans l'étude de la Nature, c'est la synthèse, la substance intégrale qui importent, et non des éléments qui ne se rencontrent pas séparés de ce qui fait leur substance.... Dans les œuvres de la Nature résident quelques merveilles. (...) Car

²⁹¹ De ce point de vue la définition de la vie proposée par Auguste Comte est éclairante : « La vie, réduite à sa notion la plus simple et la plus générale, est essentiellement caractérisée par le double mouvement continu d'absorption et d'exhalation, dû à l'action réciproque de l'organisme et du milieu ambiant, et propre à maintenir, entre certaines limites de variation, pendant un temps déterminé, l'intégrité de l'organisation». Comte Auguste ; *Cours de philosophie positive*. Tome 3. 41^{em} leçon.p.500. Disponible sur : <http://gallica.bnf.fr/>

dans les œuvres de la Nature, ce n'est pas le hasard qui règne, mais c'est au plus haut degré la finalité.

Hippocrate évoquait l'existence d'une sympathie (comme capacité de souffrir avec...) entre les parties du corps, pour rendre compte de leur nécessaire union en vue d'une fin commune. La réaffirmation de ce principe, repris et amplifié par Galien au 2^e siècle avant notre ère, permettra de rendre compte de la coordination et de l'unification des parties au tout.

L'Encyclopédie de Diderot et d'Alembert énonce sous la rubrique « sympathie » :

La *sympathie*, en physique anatomique, est donc l'harmonie, l'accord mutuel qui règne entre diverses parties du corps humain par l'entremise des nerfs, merveilleusement arrangés, et distribués pour cet effet.

Ce principe de « sympathie » entre parties demeurera un principe d'intelligibilité auquel on recourra encore dans la physiologie du 19^e siècle pour désigner les rapports existant entre deux ou plusieurs organes plus ou moins éloignés les uns des autres. C'est la sympathie entre les parties d'un même organe et entre les organes divers d'un même appareil.

Et c'est bien ce dont il faudra rendre compte : « Ce merveilleux arrangement » qui se dévoile au fur et à mesure que l'on identifie les parties constitutives d'un être vivant impose de rendre compte de leur nécessaire union, de leur nécessaire « sympathie » en vue d'une finalité.

Aristote liait finalité et forme. Galien saisissait la liaison des parties entre elles à travers un schéma d'interprétation « machiniste » : les organes comme outils au service de la vie. Dans la physiologie galéniste, les parties sont donc classées selon leur utilité : entretien de la vie, commodité de la vie, perpétuation de la race etc. Cette démarche prépare le terrain à l'assimilation du vivant à une machine harmonieusement organisée.

Ce travail de décomposition, de description fine servira de fondement à la physiologie de l'Antiquité et encore à celle du Moyen Age. Il ne sera surpassé qu'à la

Renaissance par le médecin et anatomiste flamand Vésale (1514-1564) dans *De Humani corporis fabrica* (1543).

Pour reprendre un commentaire de Georges Canguilhem²⁹² :

...Tout concourt, dans la Fabrica...à établir la relation étroite entre la structure et la fonction...rendre sensible la subordination de la construction au mouvement, de la forme à la vie...et le démontage lui-même ressemble moins à une division et dispersion de parties qu'à l'éclairage progressif d'un ensemble.

Ce « démontage » ou éclairage, s'inscrit dans une démarche d'affinement constante : tissus, fibres, cellules, organelles, s'arrêtant au stade apparemment le plus fin, là où l'organisation vivante disparaît pour ne plus laisser entrevoir qu'une matière indifférenciée, les simples « cytodes », la « substance albuminoïde » vivante dépourvue d'organisation de Haeckel. (1834-1919).

Connaître le vivant, ce serait donc pouvoir le décomposer pour en révéler les parties signifiantes ainsi que leurs articulations essentielles, le décrire et identifier les jeux de correspondances et les spécificités de chaque membre d'un ordre commun.

Ce qui apparaît alors au cours de l'histoire même des sciences de la vie, c'est le constat renouvelé, après chaque progrès dans ce procès de décomposition du vivant au vu de son analyse, de la mise à jour de modalités d'organisations nouvelles, plus ténues, mais toujours présentes, comme si la machinerie vivante décomposable à l'infini, renvoyait à chaque fois à un niveau d'organisation plus fin.

Dans ce contexte, comprendre ce serait pouvoir en donner raison sur deux plans, celui de l'ajustement des parties entre elles afin de réaliser telle ou telle fonction et celui de leur articulation en profondeur au sein de l'étagement des structures organisées qui ancre l'organisation vivante dans les composantes les plus élémentaires de la matière constitutive du vivant.

²⁹² Canguilhem Georges. *Etudes d'histoire et de philosophie des sciences concernant les vivants et la vie*. Paris : Librairie philosophique J.Vrin, 2002

Cette quête qui s'organise alors dans une sorte de recherche d'éléments fondateurs, vise à articuler l'organisme dans son entier avec les composantes les plus ténues du vivant.

Elle part des cellules qui le structurent, en passant par ses organes ou parties, ses tissus, afin de repérer ce qui, à la frontière entre vivant et non vivant marquerait de manière indubitable la particularité du vivant au sein de la Nature.

Et cette décomposition, à la rencontre de ce qui constituerait la source même du propre du vivant, jusqu'où faut-il alors la pousser ? N'est-il pas nécessaire d'aller jusqu'au stade où cette spécificité ultime, la dernière différence spécifique, se dissoudrait au sein d'une autre unité, celle constituant universellement la matière même de la Nature, pour vérifier alors, à chaque nouvelle étape de ce procès d'analyse, que le pas supplémentaire franchi, la cellule après les tissus, le « cytoplasma » après la cellule, les atomes organiques ensuite, révélerait enfin le lieu final où se constituerait et se définirait in fine la singularité du vivant ?

Mais dès lors, c'est à chaque étape supplémentaire de décomposition franchie que se renouvelle la tension entre la compréhension du fonctionnement des éléments ou parties et celui de leur rôle et place au sein du tout du vivant. Car comment rendre à nouveau compte de la singularité du vivant, du caractère finalisé de son activité, de l'organisation à son service, et du constat qu'à chaque stade de la décomposition se rencontrent aussi les principes et lois qui rendent compte du seul monde inanimé ? Finalement, comment faudra-t-il articuler les différents savoirs en cours de développement, celui de la physique de la chimie et celui de la biologie naissante qui revendique son autonomie tout en s'ouvrant aux progrès des sciences fondamentales ?

2.2.4 Le mécanisme support d'intelligibilité, l'organisation comme spécification matérielle de sa mise en œuvre

L'approche mécanique, le recours aux métaphores de la machine, fait fond sur une philosophie de la Nature selon laquelle tous les phénomènes de l'Univers s'expliquent d'après les lois des mouvements matériels. C'est ce que Descartes tient à rappeler dans sa lettre à Plempius :

...(Car) n'admettant aucun principe qui ne soit très manifeste, et ne considérant rien autre chose que des grandeurs, des figures et des mouvements, à la façon des

mathématiciens (C.à.d. à la façon de la mécanique).²⁹³

- ***Autour du mécanisme en général.***

L'originalité du mécanisme tel qu'il est exposé par René Descartes, présente d'attrayant le fait que l'on peut lier l'intelligibilité du vivant (non humain) à celle du monde en général. Dans cet ordre d'idée, la machine constituera le modèle d'interrogation et d'explication privilégié de la physiologie des animaux. Ainsi René Descartes affirmera-t-il dans les « Principes de philosophie » :

Je ne reconnais aucune différence entre les machines que font les artisans et les divers corps que la nature seule compose, sinon que les effets des machines ne dépendent que de l'agencement de certains tuyaux, ou ressorts, ou autres instruments, qui, devant avoir quelque proportion avec les mains de ceux qui les font, sont toujours si grands que leurs figures et mouvements se peuvent voir, au lieu que les tuyaux ou ressorts qui causent les effets des corps naturels sont ordinairement trop petits pour être aperçus de nos sens. Et il est certain que toutes les règles des mécaniques appartiennent à la physique, en sorte que toutes les choses qui sont artificielles, sont avec cela naturelles. Car, par exemple, lorsqu'une montre marque les heures par le moyen des roues dont elle est faite, cela ne lui est pas moins naturel qu'il est à un arbre de produire ses fruits. C'est pourquoi, en même façon qu'un horloger, en voyant une montre qu'il n'a point faite, peut ordinairement juger, de quelques-unes de ses parties qu'il regarde, quelles sont toutes les autres qu'il ne voit pas : ainsi, en considérant les effets et les parties sensibles des corps naturels, j'ai tâché de connaître quelles doivent être celles de leurs parties qui sont insensibles (...).²⁹⁴

Appliqué à l'homme ce principe d'intelligibilité conduit également à une démarche dans laquelle la machine sert de modèle d'interrogation et d'explication privilégié :

...je désire, dis-je, que vous considériez que ces fonctions suivent toutes naturellement, en cette machine, de la seule disposition des organes, ni plus ni moins que font les mouvements d'une horloge, ou autre automate, de celle de ses contrepoids et de ses roues ; en sorte qu'il ne faut point à leur occasion concevoir en elle aucune autre âme végétative, ni aucun autre principe de mouvements et de vie, que son sang et ses esprits, agités par la chaleur du feu qui brûle continuellement dans son cœur, et qui n'est point d'autre nature que tous les feux qui sont dans les corps inanimés.²⁹⁵

²⁹³ Descartes René. *Lettre à Plempius. 3 Octobre 1637.* Œuvres de Descartes publiés par Charles Adam et Paul Tannery. Correspondance : Avril 1622 février 1638. Librairie philosophique J.Vrin.1987. Paris.

²⁹⁴ Descartes René. *Principes de philosophie*, première partie.1644. <http://gallica.bnf.fr/>

²⁹⁵ Descartes René. *L'Homme.* Œuvres philosophiques. Tome I. 1618-1637. Paris : Edition de F. Alquié, Classiques Garnier, 1997

Mais cette fois-ci le modèle n'est plus fondé sur l'identité totale, machine = vivant, mais sur une analogie réservée au seul corps, « une statue ou une machine de terre » conçue de telle sorte qu'une âme de nature différente puisse s'y unir et qui par-là sauvera la possibilité d'un sujet pensant, acteur de cette analogie. Elle constituera le propre de l'homme.

Il s'agit d'une rupture radicale par rapport à l'animisme de la Renaissance. Comme le notait Georges Canguilhem : « l'automatisme des bêtes était un refus radical de l'animisme qui avait à la Renaissance, autorisé toutes les analogies : la terre est un vivant, elle a des entrailles, elle sent, elle engendre ». ²⁹⁶ Avec Descartes tout dans la nature se fait donc par « figures et mouvements ». Il s'agit bien d'une révolution de l'entendement qui a créé les conditions du développement de la physique moderne et a eu comme conséquence, à travers l'affirmation de l'unité ontologique du monde, de déplacer la quête du propre du vivant de celle d'une substance vitale vers celles de propriétés propres ou caractéristiques propres du vivant.

L'approche qui postule l'uniformité du mécanisme dans la Nature, rendant possible l'unité des principes d'intelligibilité, pose néanmoins problème. Sans entrer dans le détail de la philosophie et de la métaphysique leibnizienne nous l'emprunterons pour noter une différence de nature entre les machines humaines et celles de la Nature. Les vivants, tout en étant éligibles au mécanisme, la nature animée étant régie par les mêmes lois de la physique que la nature inanimée, sont des machines spéciales divisibles et articulées à l'infini. La différence ontologique entre machine artificielle et organisme vivant demeure, tout en rendant possible le recours à la même épistémologie. Pour Leibnitz ce qui signale cette différence entre machine naturelle et machine œuvre humaine, c'est sa capacité à se réparer, à conserver son identité grâce à ce principe d'organisation extrapolable à l'infini.

Approche mécanique et recours à un principe transcendant ne s'excluent pas nécessairement. La position théorique d'Hermann Boerhaave (1668-1738) a également

²⁹⁶ Canguilhem Georges. *Etudes d'Histoire et de Philosophie des sciences concernant les vivants et la vie*. Déjà cité.

conduit ce botaniste et médecin néerlandais, à assimiler les lois de la vie à celles de la mécanique. Dans cet esprit se développe une physiologie faite d'une somme d'analogies mécaniques exposées sur le modèle des machines hydrauliques, comme un ensemble de parties solides juxtaposées dans lesquelles circulent des fluides. L'originalité de cette pensée est qu'elle tente de synthétiser les positions inspirées du machinisme cartésien, de l'animisme de Stahl et de la métaphysique Leibnizienne de nécessaire harmonie esprit/matière (âme, forme). En effet l'analogie, strictement mécanique sera complétée par Boerhaave avec le recours à un principe transcendant, une substance, un esprit uni au corps. La vie se définit alors comme l'« état général du corps qui permet son union à une âme ». Le corps vivant, la machine est en raison de son organisation fine ce qui rend possible cette vie. La connaissance opératoire, pratique, de Boerhaave est celle d'un médecin iatromécanicien. L'approche reste fondamentalement centrée sur l'homme, et sa définition de la vie construite autour de l'union intime, âme/corps, oublie le monde animal et végétal.

A la même période, Stahl (1660-1734) affirmera l'irréductibilité de la vie au mécanisme et la nécessité du recours à un principe animiste pour rendre compte du propre du vivant, ce qui corrélativement entraîne l'extension de l'âme à tout le règne animal. Le dépassement du mécanisme par le moyen d'une nouvelle version post cartésienne de l'animisme, ouvrira la voie à l'introduction de principes explicatifs, spécifiant la particularité du vivant, fédérés autour du vitalisme. (Voir chapitre précédent).

La nécessité d'identifier le propre du vivant, en le distinguant des objets justiciables d'une approche par la mécanique rationnelle, semble s'être nouée au tournant du 18^e siècle autour du concept d'organisme. La critique du mécanisme par Stahl est en effet marquée par l'exigence de réintroduire la finalité pour rendre compte du corps comme organisme, comme ensemble d'organes, d'outils définis selon une finalité précise.

Le concept d'organisme ou d'être organisé introduit en fait une limitation à double détente. D'une part, le mécanisme en tant que disposition causale centrée sur la cause efficiente et rejetant la finalité ne saurait dans ce contexte historique rendre compte d'un fait d'expérience : le vivant est organisé. D'autre part, la machine en tant que mécanisme finalisé conduit à interroger et rechercher la cause même de la machine.

Il existe en effet une difficulté à penser l'organisme comme une machine. Celui-ci ne peut se réduire à l'action d'une force motrice, mécanique. La vie semble poursuivre un

but, une finalité interne. Des phénomènes comme la reproduction, la réparation, etc. échappent aux analogies machinistes, l'automate, la machine ne pouvant manifester de tels phénomènes. Le vivant se produit lui-même et échappe par là même à une description strictement mécaniste.

Ici, nous faisons notre le commentaire de Canguilhem sur l'apport de Kant au concept d'organisme dans le cadre de la pensée mécaniste du 18^e siècle. Kant avait identifié les conditions de possibilité de la science physique avec les conditions de possibilité (transcendantale) de la connaissance en général. Mais cette identification rencontrait ses limites dans la

...reconnaissance du fait que les organismes sont des totalités dont la décomposition analytique et l'explication causale sont subordonnées à l'usage d'une idée de finalité, régulatrice de toute recherche en biologie » (il ne peut y avoir de Newton du brin d'herbe).²⁹⁷

Kant met ainsi en avant la tension induite par la rencontre entre une démarche explicative mécaniste, centrée sur la recherche des causes efficientes et la nécessité d'expliquer le « tout » d'un organisme en faisant intervenir la finalité.

Cette tension résulte de l'affrontement entre deux nécessités, d'une part la nécessaire investigation mécanique du vivant sur le modèle horloger et d'autre part l'obligation de rendre compte de l'organisme comme un tout, comme « horloge montée ». La solution proposée par l'auteur de la Critique de la faculté de juger sera de réintroduire la finalité comme « principe régulateur ». Les organismes sont donc des totalités dont la décomposition analytique et l'explication causale restent subordonnées à l'usage d'une idée de la finalité, régulatrice de toute recherche en biologie. En somme, une science des organismes vivants mécanique, mécanicienne reste légitime dans son travail d'application et d'explicitation du rôle des lois naturelles jouant sous un rapport de cause à effet, tout en actant une irréductibilité : un corps organisé qui se produit et perdure en tant que totalité ne peut être réduit à la simple juxtaposition de ses parties.

²⁹⁷ Canguilhem Georges. *Etudes d'histoire et de philosophie des sciences concernant les vivants et la vie*. Déjà cité.

Tout se passe comme si l'épistémologie mécaniste faisait apparaître ce qui précisément n'était pas éligible à ce principe d'intelligibilité, un « reste » pour lequel on doit mobiliser d'autres ressources explicatives, comme si là encore, la spécificité de l'objet d'étude s'imposait au détriment d'une heuristique trop uniformisant.

Et la tentation restera forte de rendre compte de cette singularité en développant un corps explicatif rejetant les lois générales et universelles de la physique comme inopérantes et rendant compte de la singularité du vivant par l'intervention de principes « extra » physiques.

C'est alors le recours à l'âme comme principe psychique animant les corps, ou encore la recherche et la caractérisation de principes vitaux agissant en parallèle ou en opposition aux lois physiques, comme autant de causes spécifiques produisant les effets vitaux. C'est également le recours à des substances propres au vivant, des molécules organiques dont la combinaison conduit à la formation des vivants.

Dès lors la singularité du vivant, en tant qu'il échappe aux lois générales et universelles, se devait d'être pensé autrement qu'en recourant aux seules analogies mécaniques, aux seules lois de la physique. Elle sera recherchée dans une substance (matière et/ou forme) qui rendrait compte de l'irréductibilité de la vie au « droit » commun du monde matériel, ou encore dans des principes organisateurs de la matière, dans la recherche de lois propres au vivant.

Tout un courant vitaliste²⁹⁸ se développera, nourri par la pratique médicale, par l'étude *in concreto* d'organismes vivants. Il opposera les principes qui régissent les phénomènes physiques à ceux qui régissent le vivant. En revenant encore une fois à l'approche développée par Bichat :

La physique, la chimie etc. se touchent, parce que les mêmes lois président à leurs phénomènes ; mais un immense intervalle les sépare de la science des corps organisés, parce qu'une énorme différence existe entre leurs lois et celles de la

²⁹⁸ Canguilhem Georges. *La connaissance de la vie. Aspects du vitalisme*. Paris : Librairie Philosophique J.Vrin, Problèmes et controverses, 1989

vic.²⁹⁹

Et là, ce serait le vivant dans son entier qui ferait exception aux lois de la physique.

- ***Vers un mécanisme spécial.***

Cette approche n'épuise pourtant pas le débat mécanisme *versus* vitalisme. En faisant fond sur ce thème, mais en recherchant les racines de l'organisation des vivants dans celle de la matière, et donc en renouant et prolongeant les interrogations d'Épicure, de Lucrèce, des philosophes et des physiologues tenteront de rendre compte de la spécificité de la vie en tant qu'organisation spécifique de la matière, et donc comme une forme locale et non plus universelle d'organisation.

Nous serons conduits à revenir sur cet aspect ultérieurement. Mettons juste en exergue à ce stade, la pensée de Jean Baptiste Lamarck, inventeur du terme biologie. L'auteur de la « Philosophie zoologique » affirme ainsi que « La vie, dans les parties d'un corps qui la possède, est un ordre et un état des choses qui y permettent les mouvements organiques.... » (Philosophie zoologique)

Il n'y a alors plus aucune raison principielle pour fonder une spécificité de la vie sur des causes extra physiques, extra matérielles. Cette voie sera empruntée par nombre de savants au 19^e siècle. Ainsi, pour n'en citer qu'un, Étienne Geoffroy Saint Hilaire, dans son Mémoire sur la théorie physiologique du Vitalisme³⁰⁰ compare les corps vivants aux corps bruts, et montre le défaut de solidité des bases, sur lesquelles reposait la doctrine des vitalistes. L'auteur conteste radicalement l'opposition artificielle, entre vie et lois générales de la nature, et se livre à la recherche des lois communes aux phénomènes de la physiologie et de la physique générale.

Néanmoins, la tension entre organisation et physique commune reste au cœur des interrogations des biologistes du 19^e siècle. Claude Bernard note dans les « Leçons sur les

²⁹⁹ Bichat Xavier. *Recherches physiologiques sur la vie et la mort*. Paris : GF-Flammarion, 1994

³⁰⁰ de Saint Hilaire Étienne Geoffroy. *Mémoire sur la théorie physiologique du Vitalisme*. Gazette médicale de Paris, II, 9 ; et *réponse à quelques objections*, ibid., 62 ; 1831. <http://www2.biusante.parisdescartes.fr/livanc/>

phénomènes de la vie communs aux animaux et aux végétaux, que :

...pour le matérialisme (ici l'étude menée dans le cadre des théories physico-chimiques), la question de l'arrangement est un vrai défi. Ce n'est pas une union fortuite de phénomènes physico-chimiques qui construit chaque être sur un plan et suivant un dessin fixé et prévu d'avance... Les phénomènes vitaux ont leur condition chimique rigoureusement déterminée. Ils sont subordonnés à une succession... les agents physiques produisent des phénomènes qu'ils ne dirigent paset en tant que métaphore la force vitale dirige des phénomènes qu'elle ne produit pas.

Ce qui chez Claude Bernard est accessible à l'entendement afin de comprendre les phénomènes de la vie n'est que matériel et physico-chimique. La force vitale est réduite à une métaphore, à un langage figuré, une façon de parler pour pointer une particularité.

Et sur le plan des sciences, acte-t-on alors une limite de la connaissance par la voie de la décomposition analytique? Finalement, que peut-on connaître du vivant ? N'y aurait-il pas une incapacité structurelle de la connaissance à saisir pleinement un objet si particulier : le vivant comme organisme, le vivant échappant aux lois communes de la nature, le vivant qui ne se donne à connaître qu'au détour de sa destruction (sa décomposition analytique) ?

Est-t-on alors condamné à un positivisme sans support théorique ? Le problème central reste celui de pouvoir rendre compte de la finalité, ce lien si particulier entre le tout et les parties de l'organisme. Ce lien à ce stade nécessite de mobiliser une démarche de compréhension non mécanique, non réductible aux causes matérielles ou efficientes, et qui dès lors conduit à devoir accepter comme un donné épistémique l'organisation originelle, afin de pouvoir élaborer des explications mécaniques performantes.³⁰¹

Ces limites se traduisent dans la façon dont s'organiseront les fondements de la biologie du 19^e siècle. Au-delà de l'effort de description et de caractérisation de structures de plus en plus fines, elle oscillera entre deux pôles de pensée : l'un procédant d'une assimilation mécaniste et matérialiste de la biologie à la physique et l'autre, partant d'une

³⁰¹ Huneman Philippe. Naturalising purpose : from comparative anatomy to "the adventure of reason". *Stud.Hist. Phil. Biol and Biomedical Sc*, 2006. Déjà cité.

pétition de principe séparant biologie et physique autour du vitalisme, affirmant l'irréductibilité des manifestations vitales, ses principes, à ceux de la physique commune.

Mais notons cependant les tentatives de dépassement de cette opposition par les essais de développement d'une nouvelle cohérence du monde à travers les approches annonçant les théories de l'émergence. Ainsi J. S. Mill écrivait en 1843 :³⁰² « ces corps (vivants) continuent d'obéir...aux lois mécaniques et chimiques tant que leurs effets ne sont pas contrecarrés par des lois nouvelles qui les régissent en tant qu'êtres organisés ». La nouveauté n'est plus alors signe d'une différence d'essence mais expression d'une propriété résultante d'une organisation nouvelle de la matière qui, pour ses manifestations, reste éligible aux approches physico chimiques dès lors qu'on les saisit au niveau requis mais qui, pour une pleine compréhension du phénomène vivant, nécessite une prise en compte de la capacité d'intégration de ces phénomènes à un niveau qui communément est celui de l'organisme.

2.2.5 De l'ordre minéral à l'ordre vivant : comment penser la genèse du vivant

Deux perspectives temporelles se sont constituées pour comprendre le vivant. D'abord celle inscrite dans le développement et le cycle de vie des êtres vivants qui court tout au long de la vie du vivant individuel, cyclique, se renouvelant à chaque génération. Ensuite, dans un effort pour aller au-delà des récits de la création, ce sera celle du vivant en tant que grande famille partageant en propre la vie, tissant une histoire commune, une parenté commune tout au long d'une évolution dont l'origine se perdrait dans la nuit des temps.

C'est cette origine inscrite dans la longue durée, qui constitue un défi renouvelé à la pensée moderne et contemporaine. Car c'est l'origine même de tous les processus

³⁰² Mill John Stuart : « Those bodies (les corps vivants) continue, as before, to obey mechanical and chemical laws, in so far as the operation of those laws is not counteracted by the new laws which govern them as organized beings. *System of Logic, Ratiocinative and Inductive: Being a Connected View*. 1843, Vol. 1. Disponible sur : http://www.forgottenbooks.org/readbook_text/

fondamentaux du vivant qu'il s'agit de pouvoir penser, afin d'ancrer définitivement la vie dans un processus naturel.

Le questionnement proprement scientifique des origines de la vie avait été précédé d'interrogations et d'affirmations relatives à la génération spontanée. Il s'agissait en effet d'envisager la possibilité d'une génération de la vie à partir de la matière inanimée tout en affirmant l'irréductibilité du vivant au non vivant.

Par exemple, comment penser la possibilité de cette génération spontanée dans le cadre d'approches conférant à l'âme (substrat et forme), la propriété d'animation des corps ? En effet, comment faire émerger des êtres animés sans que leur principe d'animation soit également déjà présent dans le monde ? Dans « De la Génération des Animaux » Aristote avançait l'hypothèse suivante :

...les êtres qui se forment de cette façon...naissent au milieu d'une putréfaction...(mais) rien ne naît d'une putréfaction, mais d'une coction...les animaux et les végétaux naissent dans la terre et dans l'eau, parce que dans la terre existe de l'eau, dans l'eau du souffle, et que celui-ci est tout entier pénétré de chaleur psychique...si bien que tout est, en quelque sorte, plein d'âme...

La solution inventée par Aristote, la présence d'un principe substantiel qui caractérise le vivant dans le monde implique donc que le monde « est en sorte » plein d'âme. Mais alors, la coupure radicale énoncée dans « De l'âme » s'estompe ici, sous l'exigence d'un besoin de cohérence logique imposé par la nécessité de faire surgir la vie de quelque part.

Ce type d'aggiornamento théorique se retrouvera par la suite dans maintes démarches.

La solution imaginée par Galien est en somme plus classique. Elle fait intervenir un créateur qui construit les êtres vivants de manière harmonieuse. Ce « *deus ex machina* » évite l'aporie résultant de la théorisation d'une spécificité radicale de la vie tout en l'inscrivant dans une histoire qui en ferait remonter l'origine dans la même étoffe que celle qui a servi à constituer le monde.

La solution énoncée par le chimiste Van Helmont était par contre des plus originales. La génération spontanée était possible et se démontrait sur deux plans. Théorique, puisque la terre possède la capacité de produire pierres, métaux, plantes, animaux à partir de ferments appropriés :

D'abord (que) Dieu eut donné la vertu à la terre de produire et germer de soi-même, il lui donna aussi de sortes de ferments que d'espèces de fruits qu'elle devait produire, de sorte qu'elle pouvait fructifier et former ses fruits de sa liqueur (l'eau) sans semence des plantes précédentes...³⁰³

Le Créateur reste cependant responsable de l'origine commune des choses primordiales : la Terre, les ferments initiaux et les « vertus » par lesquelles ces choses se transformeront. Mais la démonstration est également pratique, puisque « expérimentalement » Van Helmont « fabriquait » des souris à partir de blé, d'une chemise sale etc. Notons qu'il n'y a pas d'hérédité des caractères acquis, et que cette « fabrication » témoigne de l'ordre sous-jacent de la Nature.

Dans un contexte de pensée épigénétique, John Needham, naturaliste anglais (1713-1781) près de deux siècles plus tard, pensait toujours possible cette génération spontanée. Comme Maupertuis qui, en partant non plus de particules minérales mais de « molécules organiques », entrevoyait la possibilité d'élaboration d'un nouvel être par auto-assemblage de ces particules, Needham faisait émerger le vivant dans un monde naturel par l'application d'une force végétative. Cette génération spontanée ne concernera néanmoins que les petits organismes, des « animalcules spermatiques ». ³⁰⁴La condition d'apparition de ces nouveaux êtres nécessitait donc la présence concomitante d'une nature organique et d'une force végétative.

Le transformisme de Lamarck articulera l'origine des vivants et l'évolution des espèces au sein d'une trame temporelle. Le temps acquiert en somme un pouvoir créateur, autorisant l'influence de l'environnement et la genèse de nouvelles formes vivantes. La génération spontanée est au cœur de ce système de transformation allant du plus simple au plus complexe. Mais cette génération spontanée, ou génération directe, reste réservée à la formation d'êtres primitifs, des formes très simplifiées de la vie dont le modèle était le rotifère de Spallanzani. Elle se réduit à la mise en ordre par la Nature d'une petite masse gélatineuse et la création en son sein d'un mouvement de fluides.

³⁰³ Van Helmont ; *Des principes physiques, œuvres*, 60-61 Cité par A. Pichot. Histoire de la notion de vie : Avant Descartes.

³⁰⁴ Needham. *Nouvelles observations microscopiques*. 1750. Disponible sur http://books.google.fr/books/about/Nouvelles_observations_microscopiques.html

Mais Pasteur, par ses expériences répétées, fermera la possibilité de concevoir scientifiquement une origine de la vie par génération spontanée. Il démontra expérimentalement l'impossibilité de la génération d'être vivants et clôt ainsi le débat qui l'opposait à Pouchet depuis 1858. L'inventeur de l'hétérogénie (Ou traité de la génération spontanée) avançait en effet l'hypothèse de la génération spontanée comme nécessité logique à l'explication de l'apparition de la vie sur terre dans un contexte minéral.

Subsistera alors une interrogation théorique (voire empirique), portant sur la nature du mécanisme fondant l'origine du vivant, ses spécificités dans une matière non vivante. L'enjeu demeure : passer de conjectures non testables, voire de pétitions de principe, la vie comme « arrangement particulière de la matière », à l'élaboration d'hypothèses scientifiquement recevables. La théorie fondant l'origine de la vie dans une matière sans distinction entre « animé » et « non animé », entre « corps organisé » et non organisé, permettant de reconstituer l'évènement, ou le processus fondateur de cette distinction qui semble si évidente à l'observateur, restera en effet à produire.

Rappelons que c'est toujours en raison d'exigences logiques que Weismann continuait de penser la possibilité de génération spontanée, 20 ans après les expériences menées par Pasteur : « Pour moi, je l'avoue, la génération spontanée demeure toujours un postulat logique, malgré tous les succès des efforts faits pour la démontrer. »³⁰⁵

³⁰⁵ Cité par Maurel M.C., « L'avenir d'un passé très lointain ». *Presse Universitaire de France. Revue Philosophique de la France et de l'étranger*, 2004/3 : Tome 129-3

2.3 Conclusion : les axes d'interrogations et d'explorations dans les sciences de la vie.

Cette rapide mise en perspective a permis d'identifier les questions qui continuent d'organiser le travail de théorisation des phénomènes de la vie. C'est parfois directement en continuité avec des interrogations et des approches qui ont leur origine dans l'Antiquité : il en est ainsi de l'opposition vie et non vie. C'est souvent également des questions qui restent ouvertes et sur lesquelles on ré-intervient à partir de positions nouvelles constituées au sein des sciences de la vie dans le sillage ouvert par la révolution scientifique galiléenne.

Ces continuités et changements conceptuels s'organisent autour de thématiques qui participent de deux grandes approches, l'une plus ontologique qui viserait la caractérisation de la vie ou du vivant ; l'autre plus phénoménologique qui tenterait d'en cerner les manifestations diverses et communes à travers le regard exercé de l'homme de science. Mais si nous distinguons ces deux axes, ce sera plus par commodité d'exposition que parce qu'ils traduisent des approches radicalement opposées. En effet il ne s'agit finalement que de l'expression de deux points de vue sur le même objet, l'un privilégiant le pourquoi de la chose l'autre le comment de ses manifestations ; l'un et l'autre se modifiant sous l'effet d'interactions réciproques : le point de vue essentialiste se nourrit des avancées dans la description, la caractérisation des manifestations vivantes ; l'approche empirique, positive est stimulée, voire orientée par des interrogations essentielles.

Finalement nous résumerons le foisonnement des approches exposées dans les chapitres précédents en retenant cinq thèmes qui à chaque fois associent ces deux points de vue au sein d'une interrogation fondamentale : qu'est-ce qu'être vivant ?

- ***La vie, l'être vivant, donnée première constitutive de l'ordre de la Nature.***

Le couple mort/vie structure une organisation du monde entre vivants et non vivants, animés non animés. Ce couple opère sur deux plans. L'un, synchronique oppose l'être vivant au non vivant, l'autre diachronique oppose la vie à la mort. Même si leurs lignes de partage sont mobiles, ces couples organisent la compréhension du monde et permettent d'accéder à une connaissance de la vie. Elle rend possible la déclinaison de

l'unité du monde animé à travers celle de ses phénomènes, de ses structures vivantes, de ses processus. Ce sont des principes d'organisation communs qui résultent d'une unité de forme, d'organisation, voire d'anatomie. Ce sera globalement toute la phénoménologie du vivant qui s'inscrira dans cette unité du monde vivant. L'affirmation de cette unité et sa vérification sera source de connaissance.

On peut alors s'affranchir des questionnements ontologiques et prendre le vivant, la vie comme un donné qu'il est inutile d'expliquer. Ce donné d'expérience, c'est celui d'un ordre naturel, dont on interroge les structures ou l'organisation sous-jacente qui se révèle dans ce questionnement, et qui finalement s'impose à cet autre vivant, l'homme de science.

Le vivant, donnée première, irréductible à une définition constitutive, c'est ce que semblent sous-tendre toutes les démarches de compréhension et d'explication des phénomènes vivants particuliers. Elle nourrit toutes les approches positives, avant même que ce terme prenne le sens donné par Auguste Comte. Cette position de principe, fonde la légitimité d'une science autonome qui serait plutôt celle des vivants appréhendés dans des catégories générales issues de l'expérience humaine, les animaux, les végétaux, réinterprétées et consolidées au sein de classifications formalisant l'image d'une unité, d'un ordre vivant permettant d'aller au-delà des données intuitives et fondant l'unité du monde vivant dans l'organisation de sa diversité.

Les essais de classification sont révélateurs de la présence de structures sous-jacentes au monde vivant. L'ordre naturel se révèle alors par leur construction, sa cohérence étant garante du rapport à la réalité. Et cette réalité est-elle figée, sujette à modifications par les seuls effets d'accidents ou de catastrophes, ou procède-t-elle d'un long processus fait de transformations, de dérives, d'adaptations, modifiant continuellement les organisations ?

Les dynamiques de transformation introduisent alors à la dialectique de l'unité et de la diversité des vivants. Car l'évolution au sein de ces classifications fait apparaître des parentés cachées inscrites dans l'histoire longue de ces liens. L'homme de science sera alors conduit à inscrire les vivants dans un double réseau de relations temporelles et spatiales.

La vie, dans cette perspective, transforme alors profondément le statut du vivant

humain. Toute une tradition faisait de l'Homme l'archétype du vivant, comme vivant le plus achevé, celui par rapport auquel on étalonne les autres. Plus achevé, et pendant une longue période au sommet de la création, il est également le point d'aboutissement de l'évolution vers la complexité des organismes vivants. Il réintègrera progressivement le statut de vivant banalisé tardivement au 20^e siècle, par exemple dans les classements phylogénétiques, tout en demeurant implicitement souvent, source d'interrogations fondamentales. En témoigne par exemple le choc constitué par le décryptage du génome humain révélant finalement que le nombre de gènes de ce système biologique, au départ appréhendé comme étant le plus complexe de l'ordre vivant, n'était que de l'ordre de 25000, soit notablement inférieur à celui d'une plante comme le riz (50 000 gènes).

Ce qui perdure néanmoins après l'abandon de l'homme archétypal, c'est le recours aux vivants référents, les vivants auxquels on se rapporte. L'étude de leurs propriétés, de leurs réactions aux sollicitations expérimentales, servent de support à la compréhension d'autres vivants par induction de propriétés générales à partir de celles d'un individu ou d'un groupe d'individus sélectionnés. (Par voie d'expérimentation ou d'observation directe). Le concept d'organisme modèle incarné par *mus musculus* pour les mammifères, *Escherichia coli* pour les bactéries, *drosophila melanogaster* pour les études génétiques, le nématode *caenorhabditis elegans* pour celles du développement, est la continuation, dans une perspective de recherche adaptée, du vivant référent.

- ***L'opposition vivant/non vivant autour de la spécificité du phénomène de la vie.***

Cette opposition qui sert de fil conducteur à tout ce qui participe des sciences de la vie renvoie cependant continûment aux questions relatives à la nature de cette différence, à la nature de la vie et de celle du vivant. Il s'agit du questionnement relatif à ce qui lui appartient en propre et que l'on tente de saisir à travers ce qui le particularise par rapport au non vivant. L'opposition renvoie à certains moments de l'interrogation à ce qui serait l'essence de la vie, la substance du vivant.

Elle s'est constituée à partir des approches positives et phénoménologiques qui attestent de cette opposition : phénomènes de reproduction, de mobilité, de nutrition, de respiration etc... qui pour ainsi dire signent, désignent une spécificité dont on tente de rendre compte sur un mode essentiel.

Ce sera celui d'un substrat ou d'une matière spécifique, animé par des principes propres qui nourrissent un hylémorphisme renouvelant ses problématiques au fur et à mesure de la prise en compte des approfondissements issus de la révolution galiléenne. Et ce sont alors deux chemins qui s'ouvriront pour explorer ce propre du vivant : l'un, niant la spécificité ontologique des êtres vivants pour n'y rechercher finalement qu'une organisation propre de la matière parmi les multiples dont est formé le mobilier du monde ; l'autre, maintenant ouverte l'hypothèse d'une irréductibilité ontologique du vivant afin d'y cerner la part qui ne serait pas réductible aux lois et principes régissant la matière non vivante.

Modalités particulières d'organisation de la matière, et alors il faut pouvoir saisir caractériser et expliquer ce qui constitue par-delà leur « histoire naturelle » ce qui fait que les organismes vivants, dotés de propriétés hors du commun des autres objets du monde (reproduction, métabolisme, développement...) constituent à la fois une structure matérielle éligible aux lois et propriétés communes de la matière mais néanmoins spécifique, voire singulière dans leur être au monde. Irréductibilité ontologique, et alors il est nécessaire de justifier cette exception aux lois communes de la physico-chimie autrement qu'en en restant aux seuls constats empiriquement fondés.

Les réponses seront soit de nature substantielle, la vie relevant d'une substance, d'une réalité fondamentalement différente de celles rencontrées dans la Nature ; soit elles s'organiseront autour de propositions qui renvoient à la vie comme modalité particulière d'organisation de la matière.

Car fournir une intelligibilité aux observations, pouvoir les regrouper en distinguant ce qui procède de la cause de ce qui procède de son effet, renvoi *volens nolens* à des affirmations faisant de la vie la manifestation de principes vitaux autonomes, signes de la spécificité du vivant. C'est ainsi l'affirmation de la nécessité d'une organisation, d'un arrangement spécial des corps permettant l'exercice de la vie ; l'union d'une matière et d'un principe spécifique ; ou encore l'affirmation de principes autonomes, de forces non directement accessibles au sens. Néanmoins ces forces qui lient les molécules, les parties matérielles, malgré l'action de celles extérieures au vivant qui tendent à les séparer, peuvent relever de principes compatibles avec les principes généraux de la physique, tout en étant spécifiques et propres à la vie. Subsiste néanmoins un doute : l'affirmation de l'existence de principes vitaux ne relève-t-elle pas d'une illusion nécessaire permettant de

nommer la cause de l'arrangement des choses ? Une métaphore qui rendrait possible de subsumer l'ensemble des causes partielles relevant simplement des lois et principes de la nature commune ?

Finalement la recherche de ce qui distingue la vie, le vivant, des autres objets de Nature, met en exergue des résistances explicatives, un reste, un manque, comme un déficit résiduel dans la compréhension de ce qui fait le propre du vivant. Comme si le processus « législatif » qui dirigeait les phénomènes vitaux (Claude Bernard dans les Leçons sur les Phénomènes de la Vie) demeurerait une interrogation permanente.

Et, ce qui demeure constant, c'est la nécessité de concevoir le vivant dans le cadre d'une association indissociable de matière et de forme. Parler de vie comme mode d'arrangements spéciaux, d'arrangements de la matière qui confèrent la vie à un ensemble, nécessite de dépasser l'opposition substrat/ forme (matière/âme) pour saisir dans un même mouvement de pensée ce qui en constitue l'unité. Partant de l'organisation spécifique, des conditions organiques qui la détermineraient, des niveaux d'agrégations des molécules, ce qui reste en question, ce sont les « modes spéciaux de combinaison chimique », source du procès de composition de la matière vivante.

- ***Vie, matière, organisation***

La vie est donc également un phénomène matériel qui nourrit des préconceptions à rebours de celles qui postulent l'irréductibilité ontologique du vivant à la matière et la physique commune. Ainsi on part du principe même que la vie procède de conditions chimiques rigoureusement déterminées et qu'elle résulte d'un état donné de la matière. La vie par elle-même, par ses manifestations n'est plus alors qu'un ensemble de processus chimiques, dès lors explicable par les seules lois de la physique et de la chimie. Et c'est donc le même schème explicatif qui ordonnera la compréhension des processus chimiques et des organismes vivants.

Dans cet ordre d'idée, on explique tout à partir des seules propriétés de la matière, en exploitant notamment le mouvement de ses « parties », du « choc des particules », d'une combinaison de hasard et de nécessité, le vocabulaire s'enrichissant des avancées des disciplines connexes aux sciences de la vie.

Mais il nous semble évident que cette approche, calée sur la façon d'appréhender

la réalité de la matière, ne conduit pas à évacuer aisément le questionnement sur le propre du vivant, mais plutôt à le décentrer vers l'organisation spécifique de la matière nécessaire à la formation de l'être vivant. Car au centre des interrogations sur le propre du vivant se retrouve l'organisation. Et tout l'enjeu sera d'en cerner le rôle dans l'expression de la vitalité : dispose-telle d'un rôle premier, celui d'orienter le jeu des forces physiques, de canaliser la vitalité propre du vivant ; ou n'est-elle que la résultante du jeu de rapports complexes et est-elle donc seconde par rapport à ce qui est premier, ce jeu de la matière et des forces qui la travaille ?

Affirmer que la vie est la caractéristique (ou la propriété) de l'être organisé, c'est développer une conception holiste de la vie, inscrivant la compréhension des détails du fonctionnement du vivant dans celle de la formation de l'ensemble dans lequel ils s'expriment. L'organisme, dans son développement, possède ainsi une « énergie formatrice », rendant compte du fait que les parties sont là par les autres et non uniquement pour les autres. C'est cette constitution du tout par le jeu de ses parties qui rend compte du principe de « sympathie » évoqué par la médecine antique. Ces parties ce seront les éléments matériels, révélés par l'analyse, ceux formant le niveau ultime pertinent par rapport auquel leur rapport au tout « organisé » aura un sens. C'est donc tout un niveau infra individu du vivant (organes, tissus cellules, organites...) qui se dévoile, identifiant des structures collectives qui agrègent les éléments matériels pertinents pour leur conférer le rôle, la fonction au service de l'organisme dans son entier. Ce propre du vivant qui intervient également au niveau supra individuel, par le rôle et la place des êtres organisés dans la structuration et l'organisation de l'ordre vivant lui-même. Ce rôle et cette place dans l'ordre vivant, incarné par le vivant individualisé, illustre la remarque de Hegel dans la *Phénoménologie de l'esprit* : « Un vivant singulier est à la fois l'expression d'un universel (le représentant d'une espèce, l'aboutissement d'une lignée) et une singularité authentique, finie, définie par un ici et un maintenant ». ³⁰⁶

On peut bien se poser la question de savoir si cela a encore un sens dans la

³⁰⁶ Hegel Georg Wilhelm Friedrich. *Phénoménologie de l'Esprit*. Traduction de Jean Hyppolite. Aubier, Bibliothèque Philosophique, 1977

biologie au tournant du 21^e siècle. Les questions relatives par exemple à la nature vivante d'un virus, et pour laquelle la réponse n'est nullement triviale, selon que l'on focalise son attention sur le virus ou le virion renvoient à ces problématiques. Et sur un autre plan, la présence systématique, constante d'enzymes dans tous les processus fondamentaux : réplication, transcription etc., éclaire la remarque posée par Claude Bernard d'« un chimiste spécial »³⁰⁷ qui, tout en obéissant aux lois physico-chimiques, recourait à des procédés spéciaux pour synthétiser la matière dont la vie aurait besoin. Sur un mode plus théorique, les réflexions liées à l'auto organisation identifiant et modélisant des causes structurelles, intrinsèques à un système organisé, tentent de rendre compte d'une cause formative de l'organisation de la matière.

- ***Le temps grand ouvrier de la nature.***

Deux dimensions temporelles encadrent la compréhension du vivant. Celle de son actualisation en tant qu'être organisé, celle de son insertion dans une histoire de longue durée.

Le processus de génération est interprété en recourant à une histoire, une dynamique. A partir de l'impulsion initiale conduisant à l'ajustement de diverses parties pour former le corps organisé, on essaie d'associer processus épigénétique de constitution et de développement du vivant aux processus qui rendent possibles la formation et la reproduction d'une sorte d'empreinte originare dans laquelle se coulerait les molécules organiques. Il s'agit finalement de pouvoir rendre compte du maintien de traits avantageux dans un processus de génération.

Mais au-delà des différences au sein de la communauté des vivants, c'est également une histoire commune qui se dévoile, une filiation avec les formes vivantes du passé, remontant finalement à une origine ancrée dans un monde propice et disponible pour accueillir la vie. Le thème, de fondation du vivant dans un monde inerte, renvoi au geste d'un créateur, tout en laissant place aux interrogations quant au rôle du hasard et de

³⁰⁷ Bernard Claude. *Leçons sur les Phénomènes de la vie communs aux animaux et aux végétaux*. Déjà cité.

la durée autorisant les rencontres favorables à la réunion des atomes du monde. Ces deux orientations, ou positions se rejoignent dans l'affirmation de conditions propices et préalablement nécessaires à la formation d'êtres dotés de vie.

Sur le plan épistémologique la constitution de l'ordre vivant, a ouvert des perspectives d'études renouvelées, celle des parentés et filiations entre vivants, documentées par leur trace dans le passé enregistrées dans les vivants actuels. Elle a ouvert la perspective d'une lecture historique, évolutive de l'ensemble des êtres vivants. Il s'agit sur le fond de la quête de ce qui constitue l'unité du vivant, de ce qui préside à la communauté naturelle des vivants, d'un changement de perspective considérable. L'unité, le propre, le commun des vivants se pense dans une perspective historique, temporelle, comme étant l'ensemble des êtres ayant en commun la même origine. Elle confère un sens nouveau aux structures sous-jacentes révélées par l'étude de l'ordre vivant. Au-delà des conséquences sur les termes d'un débat daté entre fixisme et évolution, sur le plan scientifique cette nouvelle perspective historique met en avant un facteur d'ordre nouveau, la durée comme pouvoir créateur du temps. Et cette nouvelle perspective, ouverte par les théories de l'évolution, mobilise deux conceptions de l'histoire. L'histoire comme déroulement, chronologie d'évènements reconstitués à partir de « documents » que l'on interprète et met en perspective à travers les théories de l'évolution, mais également l'histoire comme science paléontologique³⁰⁸ de phénomènes aléatoires, d'accidents dont on saurait reconstituer la chronique passée sans pouvoir en exprimer la nécessité d'un futur prévisible. Cette nouvelle perspective nourrira une tension, entre hasard et nécessité (pour reprendre le titre d'un ouvrage de Jacques Monod).³⁰⁹

Le vivant se donne alors à l'intersection de deux plans d'analyses ; en tant qu'objet de connaissance c'est celui de son être, et en tant que sujet de son histoire c'est celui d'un récit qui s'inscrit dans sa matérialité et qui permet d'espérer d'en retracer l'histoire. Cette

³⁰⁸ Ou science des causes passées, introduit par William Whewell dans *Histoire des sciences inductives*. Voir sur ce sujet : Gayon Jean. *De la biologie comme science historique*. Sens Public. www.sens-public.org

³⁰⁹ Monod Jacques. *Le hasard et la nécessité. Essai sur la philosophie naturelle de la biologie moderne*. Editions du Seuil, 1970

dimension historique, qui associe génération, vie, reproduction, transformation, aboute des séquences courtes productrices de variations à des transformations, des évolutions.

Dans ce contexte l'impasse des théories de génération directe, sera porteuse de nouveaux défis : penser la genèse du vivant sans recours à une sur-nature.

Ces tentatives avortées s'inscrivaient en effet dans une nécessité logique qui demeure : faire surgir la vie de quelque part, ancrer la vie dans un processus de genèse naturelle. Or les tentatives répétées pour en rendre compte de manière simple, voire naïve, à travers la recherche des conditions de possibilité de cette génération spontanée, visaient plus à définir les conditions matérielles, environnementales, favorisant l'émergence spontanée d'êtres vivants qu'à en préciser les mécanismes d'apparition.

Trois mises en perspectives épistémiques devaient dès lors fusionner afin de pouvoir rendre compte de l'apparition du vivant comme processus naturel sans recourir à un principe extra mondain : celle des conditions de possibilités d'un monde ou d'une nature propice à son accueil, celle d'une histoire possible inscrivant le vivant dans un développement temporel et enfin celle de l'unité physico chimique du monde enracinant les deux premières dans les lois et principes physico chimiques pris dans leur acception la plus large.

- ***Saisir le vivant : l'observer, l'analyser, expliquer : nécessité de la réduction et du mécanisme.***

L'observation puis l'expérimentation sur le vivant ont permis de constituer les nouvelles géographies corporelles. Elles ont mobilisé des épistémologies multiformes associant plusieurs styles d'explications : comparaisons et analogies, recours aux vivants référents, métaphores machinistes, propositions de mécanismes. Et ces démarches s'inscrivent dans des problématiques récursives : l'affinement expérimental est orienté par les stratégies explicatives, celles-ci en retour s'élaborent dans la confrontation avec des vivants mis en situation par les éléments de théorisation.

Un des enjeux de la compréhension du vivant sera donc de pouvoir « recomposer » le vivant à partir des produits de son analyse, des résultats de sa décomposition théorique et pratique. Cette recombinaison se heurte à un certain nombre d'écueils : celui de la fixation du niveau de finesse de la décomposition permettant de

mettre en évidence les éléments pertinents nécessaires à cette recombinaison, celui lié à la nécessité de disposer des règles de composition (comme équivalence aux lois de la nature) permettant d'imaginer la formation de sous-ensembles (méso organisation) faisant sens dans l'économie de l'organisme étudié.

La nécessaire décomposition du tout vivant pour accéder aux rôles de ses parties, l'étude des mécanismes physico-chimiques au niveau de pertinence le plus fin exigé par la compréhension des phénomènes vivants, introduit à une autre question récurrente, celle de la réduction du vivant (de la vie ?) aux composantes les plus élémentaires qu'il partage avec le restant du monde, et qu'il organise, assemble, utilise sur un mode propre. Si la possibilité de réduction en termes de substrat commun au mobilier du monde semble acquise, son niveau le plus fondamental étant reconnu commun à l'animé et à l'inanimé, les problématiques d'organisation de cette matière commune constitutive des vivants, restent ouvertes. Malgré les immenses acquis dans la description et la caractérisation du rôle d'organisation particulière et spécifique de cette matière, malgré l'identification du rôle déterminant des liaisons non covalentes, labiles, comme vecteur d'association de cette matière, le passage à une organisation dotée d'une finalité propre reste donc entier. Et c'est alors que se noue à nouveau la tension entre chimie décrivant les propriétés des macromolécules engagées dans les processus vivants et la physique apportant ses contraintes structurelles. On rejoue alors à nouveaux frais la tension entre causes matérielles et formelles, tension que l'on tentera de dépasser pour accéder à une pleine compréhension du vivant actuel.

Dans ce contexte, l'irréductibilité du vivant aux forces et mécanismes physico-chimiques (le mécanisme) affleure à chaque moment de synthèse explicative. Le constat répété : la vie n'est pas réductible à une « formule générale », autre façon d'exprimer l'absence de lois de formation de parties et d'ensembles vivants à partir de ses composants élémentaires, rend toute théorisation de l'articulation des lois physico-chimiques de la matière « non vivante » problématique.

L'affirmation d'une identité ontologique entre les deux ordres de la Nature, vivant et non vivant, laisse donc ouverte la question de l'irréductibilité. Celle-ci peut n'être que d'ordre épistémologique (tout en étant fondamentale). Pour reprendre les propos de Jacques Loeb, le nombre de réactions chimiques dans un organisme un peu complexe, est tel qu'il rend toute prévision de comportement de l'organisme en entier impossible. Mais cette

irréductibilité de fait ou de principe peut également résulter du fait que la vie recourt pour ainsi dire à une chimie spéciale, à des composés organiques différents, des processus de synthèse qui lui sont propres. En somme, pour reprendre les termes de Claude Bernard, elle recourt dans la Nature à un « chimiste spécial » usant de procédés différents de ceux employés dans les laboratoires.

Les débats renouvelés entre mécanisme et vitalisme, mécanisme et réductionnisme, mécanisme et spécificité du vivant (irréductible à une approche mécanique) renvoient néanmoins à un constat, celui de la permanence et de la vitalité du schème d'explication mécanique dans les sciences de la vie. Les succès ainsi que les limites de ce schème se sont construits et affinés en faisant évoluer la conception mécanique elle-même. De la manière cartésienne de penser en terme de figures et mouvements, à celle de la dynamique lagrangienne de la mécanique des chocs, à celle unifiant dans le concept de champ les forces d'actions à distance électrique et magnétique sur des particules en mouvement, puis celle investissant les interactions entre composés élémentaires de la matière, notamment décrits, analysés, théorisés au sein de la chimie etc. ce sont finalement les raffinements et les succès de la physique, de la chimie, des sciences de la matière, qui ont modelé une façon de penser et d'appréhender le vivant. Ce dont il s'agissait de disposer, c'était d'« une description causale en termes d'enchaînement d'étapes mécaniques élémentaires »³¹⁰ afin de pouvoir mettre en évidence les déterminations des propriétés d'un ensemble à partir des composés élémentaires qui le constituent.

Le succès dans l'application du schème mécaniste réside dans sa capacité à servir de vecteur heuristique dans la recherche du rôle et la place des parties élémentaires dans le comportement de l'ensemble dont elles sont parties prenantes et parce qu'il facilite, en l'organisant et l'adaptant au vivant, le transfert des connaissances acquises, théoriques et pratiques développées dans le cadre des sciences physico chimiques.

Les limites du mécanisme résident pour ainsi dire dans la difficulté à rendre compte de la formation et du rôle d'un tout organisé à partir du seul déploiement de

³¹⁰ Morange Michel. *Les secrets du vivant. Contre la pensée unique en biologie*. Déjà cité.

chaînes causales élémentaires. Soit parce que la formation d'un ensemble organisé (cellule, tissu, organe etc.), la réalisation d'une grande fonction mobilisant de nombreux processus élémentaires, résultent de la rencontre de chaînes causales indépendantes prises isolément mais rendues convergentes par l'existence même de cet ensemble ; ou encore parce ce que ce type de schème explicatif n'intègre pas les conditions structurelles imposées par l'environnement pris au sens large : contraintes structurales physiques, thermodynamiques, intrinsèques, provenant de la structure d'organisation elle-même.

Mais ceci étant, ce mécanisme si décrié comme ne pouvant pas saisir l'essence de la vie, se révèle d'une redoutable efficacité dans sa capacité à ordonnancer les séquences élémentaires, à apporter une réponse appropriée aux questions du « comment cela opère ». L'heuristique portée par la question : « quel (en) est le mécanisme sous-jacent » demeure le levier puissant d'investigation et de progrès dans la connaissance du vivant et ce, en assurant une cohérence précise, au niveau d'instanciation de ce mécanisme sous-jacent, avec les lois physico-chimiques disponibles.

Le mouvement constant de balancement entre explication par les parties (leur rôle, fonction) et explication à partir du tout, de l'ensemble, est peut-être ce qui paraît le plus singulier dans la compréhension du vivant. Si l'accès à l'histoire du vivant rend compte du rôle et de la place exercée par une fonction comme résultat d'un trait sélectionné, expliquant le pourquoi de la chose, elle ne rend pas compte dans le même mouvement explicatif du comment, c'est-à-dire du mécanisme, du rôle exercé dans l'ensemble par la fonction sélectionnée dans le processus historique. C'est finalement la question des relations des parties au tout, les parties qui composent et le tout qui rend possible l'ensemble des interrelations (selon des modes différenciées, de coopération, d'interaction, de synergies...), qui reste posée et qui est renouvelée à chaque nouvelle avancée des sciences du vivant. On rejoue pour ainsi dire à chaque fois et à nouveaux frais la tension entre cause efficiente, cause formelle et causes finales. Car comment rendre compte de la finalité de l'organisme vivant sans être tenté de réintroduire les causes finales à côté des causes matérielles et des causes efficientes ? Et ne retrouve-t-on pas cette préoccupation dans tout ce qui relève des approches morphologiques, de l'auto organisation, comme s'il continuait d'être nécessaire sur le plan de la compréhension, de disposer de la possibilité d'associer causes efficientes et causes finales.

Une des spécificités du vivant réside dans l'impossibilité de s'affranchir de toute

vision finalisée du vivant. Ce qui oppose machine et organisme (vivant) est que dans la première, la cause efficiente des parties ainsi que leur forme ne sont pas dans la nature mais en dehors, dans les mains d'un créateur. La morphologie n'est-elle pas alors une façon subreptice de réintroduire les causes finales à côté des causes naturelles, des causes efficientes ?

Ces cinq thèmes, qui pour nous résument le foisonnement des approches qui continuent d'organiser le travail de théorisation des phénomènes de la vie, peuvent être résumés dans le tableau suivant :

	Vie comme donnée constitutive de l'ordre de la Nature.	L'opposition vivant/non vivant autour de la spécificité du phénomène de la vie.	Vie, matière, organisation.	Le temps, grand ouvrier de la Nature.	Saisir le vivant : l'observer, l'analyser, l'expliquer : nécessité de la réduction et du mécanisme
Principes d'une démarche de compréhension.	La vie comme « donné », s'impose en tant que fait d'expérience. Jeu des oppositions : vivant ↔ non vivant ; vie ↔ mort.	Rendre raison du phénomène vital, de ses manifestations phénoménologiques.	Etre vivant = être organisé. Vie liée à un état de la matière.	Le vivant inscrit dans une histoire : celle de sa propre actualisation au monde, celle de ses parentés cachées.	Les phénomènes vitaux à la rencontre des « mécanismes » sous-jacents. Décomposition ou démembrement du vivant
Fondements d'une heuristique.	Vers l'unité du monde animé. Questionnement de la structure de l'ordre naturel. La structure révèle des parentés cachées.	Vie comme manifestation de propriétés vitales autonomes. Vie comme « cause »/vie comme « effet ».	Vie comme phénomène matériel relevant d'une organisation spécifique ou singulière de la matière. Vie comme « cause »/vie comme « effet ».	Reproduction : différences et similitudes. Le vivant inscrit dans un processus temporel de courte durée : sa vie. Le vivant inscrit dans un processus de longue durée : l'évolution des espèces.	Décompositions du vivant. Les fonctions : dispositifs matériels réalisant un rôle au service de l'ensemble. Elucidation des mécanismes physico-chimiques au fondement de l'activité vitale.
Questionnement et éléments de théorisation.	Nourrit les approches positives : descriptives, classificatoires, comportementales ...	Spécificité du phénomène vital par rapport aux principes et lois de la physique et la chimie des corps « ordinaires » : - union d'une matière et de principes spécifiques ; - arrangement de la matière.	L'organisation est première. Recherche de l'alliance matière/forme : la matière est organisée pour accueillir/ permettre la vie. Conception holiste de la vie.	Questionnement relatif aux filiations apparentes et cachées. Questionnement sur les origines.	Systèmes vivants comme machines perfectionnées.

	Vie comme donnée constitutive de l'ordre de la Nature.	L'opposition vivant/non vivant autour de la spécificité du phénomène de la vie.	Vie, matière, organisation.	Le temps, grand ouvrier de la Nature.	Saisir le vivant : l'observer, l'analyser, l'expliquer : nécessité de la réduction et du mécanisme
Interrogations.	Statut de l'Homme. Hiérarchie entre vivants ?	Irréductibilité de la vie aux lois communes. Tension au sein des principes explicatifs entre irréductibilité et réduction aux « lois » communes de la matière.	Quelle organisation de la matière pour orienter le jeu des « forces » physiques et chimiques ? Question récurrente présente à tous les niveaux d'analyse : du corps organisé aux composants les plus ténus.	Epigénèse. Evolutions. Génération directe ? Emergence de la vie.	Réductionnisme/holisme. Liens entre les parties et le « tout ». Irréductibilité, mécanisme.
Lignes de forces.	Les êtres vivants au sein d'un réseau temporel et spatial. Vivants référents ». Evolution vers des complexités croissantes. Biotopes.	Critères de discrimination. Cas limites.	Recherche de l'organisation « apte » à exprimer la vie.	Théories de l'évolution. Origines de la vie. Fonctions comme trait sélectionné.	Rôles fonctionnel des différentes strates d'organisation du système vivant. Explications par les parties/explications à partir du tout. Les fonctions comme disposition ou dispositif.
Points de repères.	Aristote (enquête), Théophraste, Linné, Cuvier, Lamarck...	Stahl, Leibniz, Needham, Bordeux, Wolff, Barthez, Haller, Bichat, Driesch, Grasset...	Aristote (hylémorphisme), Lucrèce, Descartes, Barthez, Buffon, Wolff, Lamarck, Berzélius, Schwann, Virchow, Wöhler...Häckel, Virchow, Bernard...	Lucrèce, Descartes, Maupertuis, Wolff, Buffon, Lamarck, Darwin...	Galien, Vésale, Descartes, Boerhaave, Hoffman, Haller, Saint Hilaire, Bernard, Loeb

Récapitulatif des thèmes

Ces cinq thèmes constituent des sortes de points de départ, des préconceptions nécessaires à l'engagement des réflexions, des démarches scientifiques dans les sciences de la vie. L'indication sommaire des auteurs que nous avons utilisés pour en dégager le contenu, indique bien qu'il ne s'agit pas de thèmes qui s'excluent mais qui peuvent être associés.

Pour conclure provisoirement ce survol, l'enjeu fondamental qui en ressort, c'est la nécessité de saisir ce qui constitue le propre de la vie en cohérence avec sa dimension d'objet doté d'une histoire tissée dans la même étoffe que celle du monde. Et cette nécessité ne peut recevoir que des réponses provisoires adossées à l'histoire jamais finie des sciences, et du rôle propre assuré par l'homme de science dans le monde vivant.

« L'idée de la vie est une de ces idées générales et obscures produites en nous par certaines suites de phénomènes, que nous voyons se succéder dans un ordre constant et se tenir par des rapports mutuels. Quoique nous ignorions la nature du lien qui les unit, nous sentons que ce lien doit exister, et cela nous suffit pour nous les faire désigner par un nom que bientôt le vulgaire regarde comme le signe d'un principe particulier, quoiqu'en effet ce nom ne puisse jamais indiquer que l'ensemble des phénomènes qui ont donné lieu à sa formation. Ainsi notre propre corps, et plusieurs autres qui ont avec lui des rapports de forme et de structure plus ou moins marqués, paraissent résister pendant un certain temps aux lois qui gouvernent les corps bruts, et même agir sur tout ce qui les environne, d'une manière entièrement contraire à ces lois, nous employons le nom de vie et de force vitale pour désigner ces exceptions au moins apparentes aux lois générales. C'est donc en déterminant exactement en quoi ces exceptions consistent, que nous fixerons le sens de ces mots ».³¹¹

La partie suivante complètera les parties précédentes grâce aux approches recourant aux modèles théoriques du vivant. Ils ouvrent des perspectives de théorisation de la vie, du vivant particulièrement fécondes. Nous y trouverons des réponses originales aux questions posées précédemment. Ils concourent à une approche formalisant et organisant l'apport pluriel et coordonné d'un ensemble de disciplines permettant de livrer une image du propre du vivant original et actualisée. Par-là, ces modèles ont vocation à dépasser les limites des définitions verbales de la vie, des «formules générales» résumant le propre du vivant. Par l'entremise d'un formalisme adapté et cohérent, ils exposent la nature de l'organisation vivante en privilégiant différentes facettes d'interrogations. Ce faisant, ils nous permettent à nouveau de renouer avec quelques-unes des grandes interrogations mises en exergue dans la partie que nous venons de clore : organisme et

³¹¹ Cuvier Georges. *Leçons d'anatomie comparée. Tome premier. Première leçon. Esquisse générale des fonctions que le corps animal exerce.* <http://books.google.fr/books>.

2.3 Conclusion : les axes d'interrogations et d'explorations dans les sciences de la vie.

machine, stabilité et variations, hasard et contraintes, milieu intérieur et environnement, vie comme propriété immanente d'une organisation spécifique de la matière etc.

TROISIEME PARTIE :

LES MODELES DU VIVANT :

TROIS APPROCHES,

TROIS SUBSTITUTS AUX DEFINITIONS DE LA VIE,

**TROIS FACONS DE MOBILISER DES RESSOURCES
THEORIQUES POUR EN SAISIR LA SINGULARITE**

3. Les Modèles du Vivant :

Trois approches, Trois substituts aux définitions de la Vie, Trois façons de mobiliser des ressources théoriques pour en saisir la singularité

Si définir c'est caractériser dans un énoncé synthétique ce qui fait le propre d'un objet, cet exercice s'agissant de la vie, du vivant, est pour le moins délicat. Tout se passe donc comme si l'objet d'étude, le vivant objet d'investigation de la biologie, était donné a priori à la sagacité inventive des biologistes afin d'en caractériser les propriétés, d'en préciser les mécanismes intimes, d'en saisir l'articulation avec l'ordre physico chimique. Et ce qu'on vise alors c'est une définition qui, comme l'expliquait Claude Bernard dans les « leçons sur les phénomènes de la vie... », résumerait les connaissances et les hypothèses qui les sous-tendent et leur confèrent leur liaison. Ce serait en somme une définition synthétisant un acquis et porteur d'un potentiel heuristique orienté vers des investigations ultérieures, un moment d'un procès de connaissance cristallisé dans un état donné.

Mais définir la vie c'est en même temps tenter de donner une réponse à une question fondamentale sur la nature même des objets matériels dotés de cette propriété. La définition engage alors une explication de la vie et vise à dépasser le donné immédiat auquel on attribue le nom de vie, de vivant afin d'en livrer son essence. En retour, on justifie la désignation d'une classe d'objets singuliers, différents du restant de ceux composant le mobilier matériel du monde et formant l'ordre du vivant. Et de ce point de vue, le recours aux modèles, sous leurs différentes formes paraît être une voie riche bien que problématique. Riche parce qu'il permet de condenser un mixte formé de connaissances observationnelles, d'hypothèses et de théorisations partielles, en assurant la convergence de plusieurs sciences autour de représentations abstraites. Le modèle sert

ainsi d'instrument de « médiation entre un champ théorique dont il est une interprétation et un champ empirique dont il est la formalisation ». ³¹² Mais ce recours reste néanmoins problématique en raison des partis pris de simplification nécessaires à leur réalisation.

Des modèles synthétiques et globaux se substituent alors aux définitions littérales pour livrer via un formalisme adapté au niveau d'abstraction recherché, ce qui constitue le propre du vivant. Par l'explicitation des hypothèses retenues, la présentation des cadres théoriques employés, ils constituent un substitut rigoureux et clair aux essais de définitions. Et si « la vie ne peut se résumer en une formule unique » pour reprendre le mot de Claude Bernard, elle semble bien pouvoir être captée dans des modèles appropriés. Mais le problème cependant, est qu'il n'existe là aussi aucun consensus au sein de la communauté scientifique permettant de retenir tel ou tel modèle comme étant le plus fructueux, ou le plus complet, ou le plus capable de rendre compte à la fois de l'unité du monde vivant autour d'une principe unique tout en rendant compte de sa grande diversité, fruit de son déploiement dans le monde terrestre.

Le terme modèle est d'un usage largement répandu dans toutes les disciplines scientifiques, mais cette profusion recouvre des réalités différentes. Elle traduit une véritable polysémie : modèles phénoménologiques, modèles computationnels, modèles explicatifs, modèles théoriques, modèles formels, iconiques, analogiques etc. La démarche de modélisation diffère tant dans l'objectif visé, que dans les démarches mises en œuvre.

La présentation et la comparaison de trois modèles, contrastés dans leurs ambitions, distincts dans les formalismes retenus, opposés quant à leur proximité avec la matière, le substrat constituant, témoignent concrètement de ces différences. Ils montreront comment chacun théorise une facette du vivant, livre une perspective différente, rendant ainsi compte de son originalité. L'objet de notre enquête est de procéder à l'analyse détaillée de ce qui est en jeu dans trois approches contrastées de démarches de modélisation, livrant chacune une approche de compréhension du vivant, et

³¹² Lecourt Dominique (direction), *Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences*. Quadrige/Presse Universitaire de France, 1999

non de réaliser la recension exhaustive des modèles du vivant.

Ces trois modèles que nous détaillerons dans les chapitres suivants s'inscrivent dans l'histoire de la biologie théorique et ont ouvert chacun des voies originales d'appréhension de la réalité vivante, repris d'ailleurs sous d'autres formes dans des travaux plus récents.³¹³ Ils ont été retenus en raison de leur caractère contrasté et non en raison de leur actualité scientifique. Ils illustrent des classes d'approches centrées l'une sur les mécanismes d'auto-organisation, l'autre sur la constitution de systèmes autopoïétiques, ou encore plus fondamentalement encore, centrées sur des approches mathématisées, relationnelles, topologiques. Le parti pris d'exposition présentera la démarche retenue par chacun pour mettre en scène l'une des facettes de la réalité matérielle des êtres vivants, réalité constitutive de leur originalité.

Avec Rosen et la « clôture sur cause efficiente », Gánti ou la vie inscrite dans la relation stœchiométrie entre trois sous-systèmes chimiques, Eigen et les hyper cycles organisant la coopération de deux types de molécules fondement d'une dynamique d'évolution ; ce seront trois façons de mettre en scène la singularité du vivant, trois façons de répondre à la question : pourquoi une chose est-elle vivante ?

Le premier fait fond sur l'organisation pour modéliser la contrainte essentielle de l'organisme, le deuxième synthétise la rencontre d'une chimie théorique avec des principes d'organisations fonctionnelles au service de l'autonomie du système vivant, enfin le troisième livre une théorie de systèmes matériels darwiniens et par là, la possibilité de fonder une histoire du vivant débutant par la « nucléation » au sein d'un milieu primitif d'organisations matérielles conduisant à la formation de systèmes autoreproducteurs intégrés.

³¹³ On peut se reporter aux travaux présentés dans : Varenne Franck, *Formaliser le vivant : lois, théories, modèles ?* Paris : Hermann Editeurs, 2010. Kupiec J.-J., Lecointre G., Silberstein M., Varenne F. (dir). *Modèles simulations Systèmes*. Collection « matériologiques », Edition Sylepse, 2008. Par ailleurs le concept d'autopoïèse que nous introduirons par la suite a présidé à la conception de « l'automate de tessalation » disponible sur : <http://www.exobiologie.fr/index.php/vulgarisation/epistemologie-vulgarisation/definir-le-vivant-lautopoiese/>

3.1 Rosen : « Life it self³¹⁴ » ou la vie *per se*

Le biologiste et physicien Robert Rosen a proposé un modèle de l'organisme vivant ayant vocation à fonder la biologie sur un plan théorique. Tout en affirmant que les vivants sont des objets matériels, Rosen recherchera la particularité de la vie, le propre de l'organisme vivant dans un mode d'organisation singulier. Cette quête se nourrit d'un constat critique : la prééminence de la physique sur les autres sciences, biologiques notamment, qui cantonnerait ces dernières à n'être qu'une sorte d'illustration des relations fondamentales mises en lumière par la première. Selon Rosen, les démarches scientifiques courantes s'organiseraient selon un présupposé théorique, assignant à la physique la prise en charge de l'universel et du général et reléguant la biologie à l'étude de dispositifs matériels. Ceux-ci ne pourraient dès lors être saisis que comme des systèmes spéciaux, «non ordinaires», ne relevant que de l'étude de réalisations spécifiques, particulières, de propriétés générales et universelles mises à jour par la seule physique. Et ces réalisations spéciales, ne pourraient alors être étudiées et comprises qu'à partir de leurs recensions exhaustives. Sur un plan théorique, c'est la spécification des contraintes initiales et des conditions limites présidant à la formation de ces systèmes matériels qui seules en assureraient la compréhension et seraient au fondement explicatif de leurs propriétés. Dès lors, dans cet ordre d'idée, fondamentalement, la biologie ne serait qu'une science stérile sur le plan théorique, n'ayant pas vocation à nourrir les sciences fondamentales de problématiques propres et ne pouvant alors qu'être muette³¹⁵ face aux questions relatives à la nature de la vie.

L'approche de Rosen s'est constituée à rebours de ce tropisme. Ses travaux s'inscrivent dans la tradition de pensée amorcée par le physicien Walter Elsasser à la recherche de lois propres aux organismes ou lois bio toniques qui sans contredire les lois

³¹⁴Rosen Robert, *Life Itself. A comprehensive inquiry into the nature, origin, and fabrication of life*. New York: Columbia University Press, 1991

³¹⁵ Rosen, tout en introduisant le thème « what is life » ne fait référence à Erwin Schrödinger qu'à travers ses travaux de mécanique quantique. Est passé sous silence l'ouvrage de cet auteur portant sur les propriétés fondamentales de la vie (cristal apériodique, néguentropie) in « *What is Life*. Cambridge University Press. 1967 »

universelles de la physique ne pouvaient en être simplement dérivées.³¹⁶ Rosen reconnaîtra de même une dette à son maître Nicolas Rashevsky, promoteur de la biologie relationnelle (1954). L'approche relationnelle partait de l'idée qu'aucune collection de descriptions (ou modèles) partielles de l'organisme ne pouvait par simple juxtaposition, ou addition les unes aux autres, rendre compte de l'organisme comme un « tout ». C'est dans cette perspective que Robert Rosen placera « *Life itself* ».

L'entreprise de Rosen se constitue donc dans un double rejet. Celui du recours à un principe extra physique, au vitalisme pour rendre compte de la spécificité du vivant, car les objets vivants sont et demeurent des manifestations de la matière ressortissant des approches physico-chimiques. Mais c'est également celui d'un réductionnisme éliminativiste gommant toute spécificité théorique du vivant.³¹⁷ A travers l'approche relationnelle et formalisée des systèmes vivants, des organismes, Rosen met en évidence l'impasse explicative à laquelle mènent les métaphores machinistes en biologie, impasse pour rendre compte du tout de l'organisme et non comme instrument permettant de comprendre tel ou tel aspect, telle ou telle phénoménalité du vivant. Rosen fondera la réponse à la question « qu'est-ce que la vie ? » par le rejet d'une forme de réductionnisme postulant que la vie n'est que la conséquence des processus physiques sous-jacents à l'organisme sans accorder à ce dernier un rôle propre canalisant, organisant, contraignant, le jeu des forces physico-chimiques. Et cette réponse se développera en privilégiant un autre plan d'analyse, mettant entre *parenthèses* les analyses mécaniques du jeu des forces physico chimiques, pour étudier ce qui procède de contraintes intrinsèques, propres aux systèmes organisés, aux organismes. Dans la même veine sera critiquée l'approche évolutionnaire inscrivant la vie au sein d'un processus historique contingent, échappant à tout principe universalisable. Car, dans cet ordre d'idée, la biologie se condamnerait à

³¹⁶ Ce point avait été fortement critiqué par Jacques Monod qui rangeait ces théories dans la catégorie du « vitalisme scientifique » qu'il rejettera au nom des progrès de la biologie moléculaire, comme étant des « spéculations stériles » : Monod Jacques, *Le hasard et la nécessité. Essai sur la philosophie naturelle de la biologie moderne*. Seuil, 1970

³¹⁷ Dans cette approche on part de l'idée que les objets macroscopiques possèdent une part de réalité qui ne peut être réduite aux seuls composants et forces élémentaires : atomes, particules subatomiques, champs de forces élémentaires. Cette approche implique une réalité ontologique multiple et fonde également l'autonomie épistémologique des sciences de la vie.

n'être qu'une science d'observation, échappant à une compréhension globale du phénomène observé, incapable de préciser les causes ou raisons fondamentales de la chose elle-même.

Une des spécificités de la biologie réside dans la difficulté à définir la vie, à énoncer sur un plan théorique pourquoi un système, une chose est vivante. Cette difficulté procède d'une limitation épistémique. En effet, selon Rosen, la tradition newtonienne de « *l'hypothesis non fingo* », ³¹⁸ engage fondamentalement à ne pas rechercher l'explication du « pourquoi » des choses, de l'existence des systèmes étudiés mais seulement à rendre compte de leurs évolutions, car renvoyant à une réponse causale elle conduirait à un risque de régression à l'infini. ³¹⁹ Cette position théorisée au sein de la mécanique rationnelle comme suite de changements d'états, fonde également les analogies mécaniques du vivant inscrites dans ses seules dynamiques temporelles. Mais définir la vie engage un questionnement relevant de thématiques explicatives orientées vers ce qui permet de qualifier un système matériel donné, d'organisme (vivant). Dans cette perspective, Rosen montrera que les modèles procédant par analogies mécaniques ne sont pas adaptés à donner la réponse adéquate. Au mieux ils servent à expliquer certains des traits du fonctionnement vivant ainsi représenté, mais jamais la totalité vivante.

Implicitement, il semble que les sciences de la vie fonctionnent selon un principe reposant sur la description et la connaissance de toutes les formes de vie afin de répondre à la question sur la nature de la vie. Rosen s'oppose à cet implicite en affirmant que ce qui obère notre capacité à comprendre (la vie) c'est précisément la tentative de banalisation de l'objet de la recherche biologique en n'y investiguant que les seuls mécanismes universels

³¹⁸ « Je n'avance pas d'hypothèses », formule employée par Isaac Newton : « Je n'ai pu arriver à déduire des phénomènes la raison des propriétés de la gravité et n'imagine point d'hypothèses, *hypotheses non fingo*. Car ce qui ne se déduit point des phénomènes est une hypothèse ; et les hypothèses, soit métaphysiques, soit physiques, soit des suppositions de qualités occultes, soit des suppositions de mécanique, n'ont point lieu dans la philosophie expérimentale. Dans cette philosophie, on tire les propositions des phénomènes et on les rend ensuite générales par induction. (Newton Isaac, "*Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*", General Scholium, troisième édition, 1726, page 943, la traduction française sera faite par la Marquise du Châtelet) ».

³¹⁹ Selon Rosen, en physique contemporaine, la question « pourquoi » et la réponse « parce que etc. » seraient remplacés par un « quoi », ouvrant des champs de réponse de type « cela... ».cf. page 15 de « *Life Itself* », ouvrage cité.

au fondement des développements de la physique. C'est cette banalisation qui conduit à une impasse car elle évacue la spécificité du vivant. Chez Rosen, les objets biologiques restent intrinsèquement complexes dans le sens où leur réduction en parties élémentaires emporte toujours une vision de la totalité dans laquelle elles s'insèrent.³²⁰ Certes, à travers le démembrement de l'organisme, sa décomposition en parties élémentaires, le vivant reste accessible (intellectuellement parlant) au biologiste. Il est aisé de traiter ces parties isolées comme s'il s'agissait de parties en situation dans l'organisme. Et alors, lorsqu'on dresse la liste des critères caractérisant l'organisme (vivant) on ne recourra à aucune propriété qui ne puisse séparément être simulée ou incarnée par un système inorganique, confortant ainsi les approches de bio mimésis, de biologie artificielle qui, partant du principe qu'en incorporant dans un système matériel un nombre suffisant de ces propriétés on pourrait recréer le système vivant.³²¹

Dans les sciences de la vie, la situation est différente. Il reste difficile de confondre un système artificiel avec un organisme vivant, et pour Rosen discriminer un organisme (vivant) d'un système mécanique ne peut être réalisé par la simple élaboration d'une liste discrète de traits, de propriétés ou d'attributs, car ceux-ci reposent sur la connaissance préexistante des organismes vivant.

Rosen reviendra à maintes reprises sur l'analogie entre organisme et machine, sur l'emploi de la métaphore machiniste comme fondement explicatif du vivant. Le recours à la métaphore de l'animal machine par René Descartes, la vie appréhendée comme système mécanique doté d'automatismes, reste justifié par le fait qu'il est plus aisé de dire à quoi ressemble l'organisme que de dire ce qu'il est. Sur le fond, l'analogie accompagnera donc la biologie durant toute son histoire, tout en se modifiant au fur et à mesure de l'évolution des sciences. Et de ce point de vue, la biologie moléculaire sera *in fine* l'ultime incarnation de l'automate cartésien, sous forme d'usine chimique, de servomécanisme, de calculateur.

³²⁰ On ne fait que reprendre ici la conclusion de Kurt Goldstein dans « *la structure de l'organisme* » : « ...Par là, le particulier s'avérait impropre à la reconstruction du tout ; toutes les parties renvoyaient par-delà elles-mêmes au tout, à un fondement d'une autre espèce qu'elles-mêmes et à partir duquel seulement un ordre paraît leur être conféré ». Goldstein Kurt, *la structure de l'organisme*. Tel, Gallimard, 1983, p 435

³²¹ De ce point de vue, c'est la même idée qui est véhiculée par le test de Turing : une machine qui posséderait suffisamment de traits d'intelligence doit être intelligente.

Dans ce point de vue machiniste, *Escherichia Coli* se réduit à un distributeur automatique dans lequel il suffirait d'introduire le bon jeton pour qu'il délivre le produit désiré prêt à être récolté.³²²

C'est sur cette toile de fond que s'est donc déployé le réductionnisme moderne. Une machine est formée d'entités, de parties et la façon dont ces parties interagissent, en constitue la physiologie. Le mode d'assemblage des parties (ou qui ont pu s'auto-assembler) trace un chemin révélant leur origine. La démarche heuristique classique relève de la dissection, de la fractionnabilité, du démembrement et de la décomposition de la machine en ses parties constitutives afin de les caractériser, les analyser chacune comme des sous-systèmes indépendants. Selon Rosen, c'est ce qui demeure au cœur de toutes les démarches scientifiques au nom d'une règle qui s'exprimerait ainsi : séparer une mixture en ses substances pures puis attribuer les propriétés du tout aux propriétés des parties ainsi identifiées.

Et cette démarche ne pose aucun problème de principe s'agissant des machines et autres artefacts humains. Les propriétés des parties, considérées isolément entraînent ou impliquent collectivement les propriétés de l'ensemble constitué. Les parties forment les sous unités analytiques qui permettent de résoudre deux problèmes de nature différente : la manière dont le système est élaboré et la manière dont il fonctionne (origine et fonctionnement).

Bien évidemment, toutes les façons de décomposer ou de fractionner une machine ne sont pas pertinentes. Il faut disposer du processus d'investigation qui sauvegarde l'information relative à leur fonction (par exemple celui du positionnement des parties etc.) au fur et à mesure du déroulement de cette décomposition (En effet, sinon il suffirait de donner un coup de marteau sur une montre et d'en récupérer les fragments).³²³

³²² La synthèse de l'insuline humaine par la bactérie *Escherichia coli* modifiée par génie génétique semble relever de cette démarche...

³²³ Il existe en physique des systèmes complexes qui ne sont pas justiciables de cette analyse permettant de résoudre le problème par séparation des composants. Rosen évoque d'ailleurs le problème des « trois corps » traité par René Poincaré.

La métaphore machiniste entraîne donc une heuristique particulière privilégiant l'approche analytique et présupposant la stabilité de l'identité des objets à analyser afin de pouvoir répondre à la fois au comment et au pourquoi de la chose. Mais en biologie, le fait qu'il y a tellement de parties à séparer, à caractériser et à réinsérer dans un ensemble fonctionnellement opérant, reste un défi. Pour cette raison Rosen récusera la métaphore mécanique car impliquant une vision radicalement erronée de l'organisme comme somme de composants.

Rosen rendra néanmoins justice à la théorie des systèmes dont l'objet est précisément l'étude des systèmes en tant que tel (*per se*). Etude dont l'objet est la mise en évidence, l'explication et la compréhension de ce qui constitue les propriétés intrinsèques d'un système étudié *in abstracto* de son incarnation matérielle.³²⁴ Partant de ce paradigme systémique, Rosen axiomatisera la propriété intrinsèque de l'organisme, son ultime spécificité caractérisée sur le plan organisationnel et non dans celui de son substrat et qui, au-delà des diversités résultantes des incarnations matérielles en constituerait l'essence.

3.1.1 Le propre de l'organisme vivant : la clôture sur cause efficiente

A la question « qu'est-ce que la vie »³²⁵ qui introduit le chapitre 10 de « *Life itself: the preliminary steps* » Rosen répond, après avoir élaboré un modèle formel de l'organisme, par cette affirmation : « un système matériel est un organisme si et seulement si il est clos sur la cause efficiente ». Cette formulation, au regard de la doxa scientifique est bien évidemment provocatrice, tant elle fait écho à des conceptions qui, à la première lecture, relèvent de notions pré scientifiques. Afin d'éclaircir cette approche nous présenterons brièvement les éléments saillants du modèle, l'explicitant tout au long de l'exposé des concepts et partis pris mobilisés par Rosen pour restituer une des facettes fondamentale

³²⁴ Par-là Rosen s'inscrit dans une approche privilégiant l'analyse de la permanence des formes, de la structure de l'organisme comme un tout, faisant passer l'analyse de la « matière » constitutive du vivant au second plan. On peut en situer l'origine dans les travaux de D'Arcy Thomson : *Forme et croissance*, Seuil, Sciences ouvertes, 2009

³²⁵ Rosen reprend dans cette interrogation le titre de l'ouvrage d'Erwin Schrödinger : « *what is Life ?* » Cambridge University Press, 1967, mais sans y faire référence dans aucune des parties de son propre ouvrage « *Life Itself* », est-ce pour signifier une mise à distance supplémentaire par rapport aux approches physiques « classiques » ?

des systèmes vivants.

- ***Présentation succincte du modèle relationnel formel des organismes : le système M, R ou « Métabolism and Repair. »***³²⁶

Le modèle formalisé, développé par Rosen, repose sur des diagrammes de blocs abstraits représentant les relations causales entre les composants fondamentaux de l'organisme.³²⁷ Ces types de composants sont au nombre de trois : ceux liés au métabolisme, ceux assurant les fonctions réparatrices, et ceux qui répliquent ces dernières. Il convient de noter que les intitulés de ces catégories de fonctions ne sont pas les décalques de leurs homonymes biologiques. Nous y reviendrons plus loin lorsque nous examinerons les interprétations du modèle « M, R » en biologie théorique.

Les diagrammes de bloc³²⁸ abstraits au cœur des techniques de modélisation utilisées par Rosen, constituent le graphe des morphismes³²⁹ entre objets de différentes catégories. Ces objets peuvent être des ensembles et des applications (au sens de la théorie des ensembles). Appliqué aux interrelations « mécaniques » par exemple au sein d'une machine, un tel diagramme de bloc les représente comme un système de contraintes portant sur l'ensemble des états élémentaires possibles de ce système matériel et traduisant son organisation. Rosen montre que dans un tel système mécanique, l'essentiel des déterminations causales des états du système demeure externe au système. Elles appartiennent ou procèdent donc de l'environnement et non de « l'intérieur » même du système. S'agissant alors des organismes, Rosen affirmera que l'on se trouve dans une perspective radicalement différente. Leurs diagrammes de blocs abstraits traduisent un maximum de déterminations internes au système matériel. Ce sont ces déterminations qui

³²⁶ Il s'agit ici d'une présentation très simplifiée.

³²⁷ La définition d'un organisme, la clôture sur cause efficiente, est donc complétée ou associée à l'identification de trois catégories de composantes nécessaires pour que le principe précédent puisse être mis en œuvre.

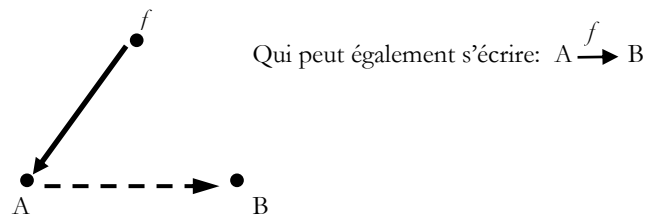
³²⁸ Ces diagrammes de blocs peuvent s'analyser comme des cartographies de relations de déterminations entre les divers types de composants.

³²⁹ Morphisme : application entre deux ensembles permettant de conserver la structure de l'ensemble. Dans la théorie des catégories le morphisme possède un sens plus large, ce n'est plus nécessairement une application.

seront analysées en termes de « causalité efficiente ». La différence entre machine et organisme s'énoncera dans l'affirmation théorique de clôture sur « causalité efficiente ».

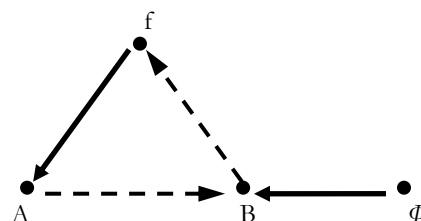
Le modèle formel, simplifié, de l'organisme est élaboré à partir de trois composants « types » : le composant « métabolique », le composant « réparation », le composant « réplication ».

Le composant métabolique « f » est représenté par le diagramme relationnel suivant :



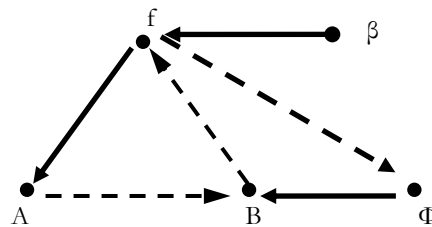
Dans ce diagramme, la flèche pleine représente la « cause efficiente », « ce » par quoi les intrants A du système sont transformés en extrants B, et la flèche en pointillés représente la « cause matérielle ». On modélise ainsi le processus métabolique qui produit un *output* B à partir d'un *input* A. f , application de A sur B, représente le « processeur » du métabolisme. A ce stade de la modélisation ce « processeur » f n'est déterminé par aucune cause interne au système (il ne résulte pas encore d'interactions modélisées au sein du système).

L'étape suivante consistera à élargir le diagramme en y incorporant un nouveau processeur, un composant Φ dit de réparation, qui sera également application de B sur f . Elle détermine alors (ou est la cause de) f à partir de l'ensemble B selon le diagramme suivant :



Cette fonction de réparation Φ , correspond chez Rosen, aux activités liées au maintien de l'organisme. Φ est ici « cause efficiente » de f et B sa « cause » matérielle. Φ est ce qui permet d'utiliser une partie des produits du métabolisme afin de produire le « processeur » f .

Sachant que Φ doit être « produit » ou déterminé au sein du système matériel, Rosen complète le modèle en introduisant une nouvelle fonction, dite de « répliation » β . Cette fonction déterminera à son tour Φ . Cette fonction, ou encore ce processeur β , sera ainsi « cause efficiente » de Φ (la « cause matérielle » de Φ étant f). L'introduction de β conduit alors au diagramme suivant :



Rosen recourt également à la notation abrégée : $A \xrightarrow{f} B \xrightarrow{\Phi} H(A, B) \xrightarrow{\beta} H(B, H(A, B))$

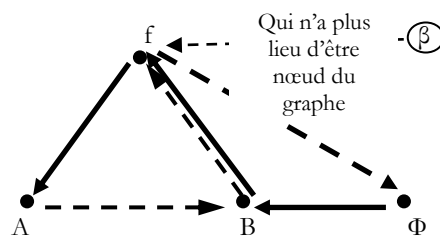
Dans ce formalisme A, B sont les ensembles sur lesquels s'applique f (processeur métabolique), et $H(A, B)$ dénote l'ensemble des applications de A sur B. Cela signifie également (dans le cadre d'un formalisme inspiré par la théorie des catégories) que Φ détermine une image $\Phi(b)$ dans l'ensemble d'applications $H(A, B)$ de tout élément $b \in B$. L'image $\Phi(b)$ sera une application qui pourra à son tour déterminer un nouvel élément (processeur de réparation) etc.

On conçoit que sans contraintes supplémentaires la démarche se prolongerait

indéfiniment par la recherche d'un nouveau processeur déterminant β et ainsi de suite.

Partant des données issues de l'analyse des systèmes vivants, Rosen retient l'hypothèse que cette fonction β procède elle-même des fonctions « métaboliques » et « réparations », comme sous-produit de l'action de ces deux processeurs.³³⁰ Elle est dès lors déterminée matériellement par le processus qui transforme les intrants A en extrants B, et par la transformation d'une partie de ces derniers en produits fonctionnellement et matériellement actifs susceptibles d'agir sur f et β . La conséquence sur le plan formel est que β n'a plus lieu d'être nœud du graphe relationnel car représentant une fonction déjà présente dans la catégorie des extrants B. On notera alors que de ce fait, B sera à la fois « cause matérielle » et « cause efficiente » de f . On traduit ainsi sur le plan formel le principe même de « clôture sur cause efficiente ». Nous analyserons plus loin le sens qui sera accordé à l'ensemble de ces processeurs en référence aux systèmes biologiques réels.

Le diagramme relationnel de l'ensemble devient alors le graphe de l'organisme :



Dans ce diagramme on identifie alors aisément les trois fonctions (au sens de Rosen) majeures fondement de l'organisme :

³³⁰ Dans "Life itself" Rosen fait référence à ses travaux précédents : Rosen R., A note on replication in (M, R) systems. *Bul. Math. Biophys.* 1966, 28: 149-151. Et : Rosen R., Further comments on replication in (M, R) systems. *Bull. Math. Biophys.* 1967. 29, 91-94

La fonction métabolique (M) telle que : $A \xrightarrow{f} B$ (cause matérielle A, cause efficiente f)

La fonction réparation (R) telle que : $B \xrightarrow{\Phi} f$ (cause matérielle B, cause efficiente Φ)

La fonction réplication telle que : $f \xrightarrow{B} \Phi$ (cause matérielle f , cause efficiente B)

Finalement, la « clôture sur cause efficiente » traduit l'internalisation dans l'organisme de ce qui garantit la permanence de son système matériel. Cette permanence n'est pas limitée aux supports de l'hérédité, mais résulte de l'action de tout ce qui dans un organisme concourt à la capacité à maintenir l'invariance organisationnelle d'un système nécessairement ouvert sur les plans matériel et énergétique.

Ces trois fonctions spécifient sur un plan général et abstrait les contraintes relationnelles entre l'ensemble des « causes » efficientes.

Notons que si le système est clos du point de vue des relations « causales efficientes » (nous reviendrons ci-après sur cette question), il ne l'est évidemment pas pour ce qui concerne les causes matérielles dont la source des déterminations causales se situe hors du système matériel, dans son environnement. Dans le diagramme de bloc de l'organisme, l'environnement du système est comme « mis hors circuit » et n'intervient qu'à travers l'intrant initial A.

Rappelons encore que la structure du diagramme est particulière, en ce qu'elle évite la régression à l'infini car la fonction de réplication est exprimée à partir des fonctions métaboliques (M) et réparation (R). Cette organisation singulière est donc conséquence ou déterminée au sein du système par des relations de type « causalité efficiente ».

- **Formulation littérale.**

Elle résume sous forme axiomatique la démarche théorique de Rosen : « un système matériel est un organisme si et seulement si il est clôt par rapport aux causes efficientes ».

Ce qui est défini n'est donc pas directement la vie, mais la propriété intrinsèque de

l'organisme. On identifie vie, vivant, à l'organisme pour caractériser alors ce qui fait que ce dernier en tant que système matériel, diffère radicalement des systèmes mécaniques. En effet, l'analyse de cette différence réalisée par Rosen montre que le système mécanique reste ouvert à la fois sur les « causes matérielles » et « efficientes ».

Le propre de l'organisme se définit donc en opposition à celui de la machine (ou système mécanique), comme système matériel clos sur « la cause efficiente ». Cette affirmation mérite d'être explicitée, d'une part par l'originalité même de l'approche visant une définition essentielle et d'autre part parce qu'elle fait fond sur des typologies causales réactivant les quatre causes aristotéliennes. Nous reviendrons sur ce dernier point plus loin. D'emblée, elle vise un degré d'abstraction élevé dégagé des instanciations concrètes réelles des espèces vivantes, objet des sciences naturelles. Elle renvoie à une définition constitutive de la vie et n'est plus une formulation résumant l'état de connaissances actualisées par les sciences de la vie. Elle a pour ambition de cerner l'essence même de l'organisme vivant et s'inscrit dans une vision organiciste et systémique des vivants. Ce qui est défini, ce n'est pas la propriété vitale, sa caractérisation à travers une liste d'attributs, mais ce qui permet de saisir la singularité d'un système matériel comme un ensemble de parties formant un tout. Et cette définition ne fait aucune référence ni à un substrat matériel, celui décrit et analysé par les biochimistes, ni aux propriétés caractérisant le phénomène vital : reproduction, métabolisme, etc.

Ce qui est affirmé, c'est que la vie s'inscrit dans un schéma relationnel fondamental spécifiant les relations entre parties ou composants d'un système matériel singulier : l'organisme. Dans cet ordre d'idée, la présence de tout composant au sein d'un tel système est expliquée par le rôle (la fonction) qu'il y assure. Pour reprendre le langage de Rosen, la question du pourquoi (quelle est la cause) de la présence de ce composant ne peut recevoir sa réponse qu'au sein même du système. Et c'est la contrainte imposée sur cette dernière, une forme de causalité correspondant à la catégorie de « cause efficiente aristotélienne », ce par quoi la chose est, qui sera constitutive de l'organisme.

L'élaboration de cette définition passe par un long détour théorique mobilisant la

théorie des catégories appliquée à l'analyse des systèmes mécaniques, des machines d'abord pour après spécifier ce qui, en différence, constitue le propre de l'organisme. Une des conséquences de cette analyse est qu'un tel système matériel ne peut avoir de machine pour modèle (Le paradigme de la machine étant la machine de Turing)³³¹ et n'est en conséquence pas simulable. L'organisme se définit dès lors en contrepoint des systèmes mécaniques, systèmes qui eux resteront computables en droit.

- ***Remarques concernant ce modèle relationnel : propriétés intrinsèques au système matériel, causes extrinsèques, finalités.***

Le composant appelé f , détermine le flux de matière entre intrants et extrants. Il représente en somme la physiologie de l'organisme modélisé par le système « M, R » (*Metabolism and Repair*). Mais par ailleurs f est « produit » par le composant Φ qui représente la fonction réparation (*Repair*). De ce point de vue la physiologie de Φ réside dans la fabrication de f . Le système relationnel « M, R » décrit donc également une situation dans laquelle le processus de fabrication est internalisé au sein même du système. La réalisation matérielle d'un système « M, R » revient donc à réaliser un système de production qui détermine en son sein un autre type de système de production. Ou encore, toute les fois où on internalise au sein d'un système un ensemble productif en l'associant à ce qu'il élabore, on aura un système « M, R ». La biologie devient alors la science des classes de réalisation matérielles de ce type d'organisation relationnelle. Dans cet ordre d'idée, la définition de l'organisme est prise par Rosen comme constitutive sur le plan théorique de la biologie.

On notera à nouveau que la définition de la vie reste liée étroitement à une organisation type et non plus (en première analyse) à un substrat matériel déterminé. On peut en conclure que toute réalisation matérielle de ce graphe (ou de graphes possédant la

³³¹ La machine de Turing est un modèle abstrait de calculateur universel. Il est composé d'une mémoire infinie sous forme de ruban divisé en cases, d'une tête de lecture se déplaçant sur le ruban, d'un ensemble fini d'états et d'une fonction de transition précisant l'état suivant, le caractère qui remplacera celui se trouvant sous la tête de lecture, le sens de déplacement de la tête de lecture. D'après Wolper Pierre « *introduction à la calculabilité* » Paris : Dunod ,2006

même propriété) constituera un organisme.

Mais subsiste une interrogation : pourquoi un tel système ? Si ce système « S » est un système « M, R » capable de réplication (au sens biologique), la réponse est triviale : « parce que S ». Mais alors on évacue la question de l'origine de « S ». La seule cause efficiente de « S » est « S » lui-même, qui acquiert alors le statut d'élément fondamental à l'instar de certaines particules élémentaires (fondamentales) de la physique. Rosen évoque cependant la possibilité de concevoir l'origine de ce système « S » comme résultant d'un système « M, R » plus grand qui pourrait produire « S ».

3.1.2 La théorisation de l'organisme vivant par Rosen : concepts et contextes de théorisation.

La formulation à laquelle aboutit Rosen : un organisme (vivant) est un système matériel clos sur la cause efficiente, peut heurter le lecteur car elle prend à rebours un acquis des sciences, l'abandon des quatre causes aristotéliennes au profit d'une seule cause efficiente et matérielle. Par ailleurs elle repose sur un corpus théorique qui recourt abondamment à la théorie des catégories qui peut dérouter au premier abord. Il nous semble donc nécessaire d'exposer sommairement la démarche théorique qui sous-tend la formulation de Rosen et tenter d'en expliciter les enjeux principaux.

- ***La biologie relationnelle pour un modèle relationnel de l'organisme***

Rosen inscrit sa réflexion dans le contexte de la biologie relationnelle, courant de recherche ouvert par Nicolas Rashevsky en 1954 et défendu vigoureusement dans « *Life Itself* ». Une des affirmations de Rashevsky retiendra particulièrement l'attention de Rosen:

... ainsi que nous l'avons examiné, une application directe des principes physiques employés dans les modèles mathématiques de phénomènes biologiques en vue de bâtir une théorie de la vie...n'est vraisemblablement pas fructueuse. Nous devons rechercher un principe qui relie les différents phénomènes physiques impliqués et qui exprime l'unité biologique de l'organisme et le monde organique comme un

tout.³³²

Dans cet ordre d'idée seront investiguées les déterminations (causales) qui maintiennent les relations fondamentales au sein d'un système soumis à de constantes modifications dynamiques. C'est, *in fine*, la recherche et la caractérisation de l'organisme *per se*, l'identification du rôle joué par l'organisation en tant que telle. On y fait fond sur les composants de l'organisme comme dispositifs matériels exerçant un rôle donné, garantissant par leur fonctionnement de concert sa permanence. Cette démarche fait fond sur l'approche organisationnelle³³³ de la fonction et mobilise deux concepts : celui de composant comme unité matérielle d'organisation et celui du rôle assuré au sein de l'organisme. Ce rôle, la fonction, se définit alors comme relation entre la partie, le composant, et un tout, l'organisme. (Théorie relationnelle des systèmes). Par ailleurs, l'identification de la fonction exercée par l'unité matérielle formant le composant résulte chez Rosen d'une démarche active, expérimentale, passant par la reconnaissance de la différence de comportement du système (ou de l'organisme) induite par sa suppression. On notera qu'ici, la partie, le composant en tant qu'entité matérielle, ne préexiste pas à la fonction.

Mais au-delà de la décomposition analytique du système, de l'identification des composants pertinents au regard du rôle exercé, ce qui est visé c'est l'élaboration d'un modèle relationnel, abstrait de la matière qui le constitue. Dans cette démarche d'abstraction, de désincarnation, les composants de l'organisme seront réduits au statut de « particules élémentaires » de fonction (*particle of function*) jouant un rôle similaire au point matériel sans dimensions (mais avec masse) des modèles mécaniques newtonien. Ces composants, à l'instar de ces points matériels, constitueront l'unité analytique élémentaire dans laquelle un système naturel pourra être décomposé. Ces parties ou composants, en

³³² Traduction de : « ...As we have seen, a direct application of the physical principles used in the mathematical models of biological phenomena, for the purpose of building a theory of life...is not likely to be fruitful. We must look for a principle which connects the different physical phenomena involved and expresses the biological unity of the organism and the organic world as a whole ». Rashevsky Nicolas, *Topology and life: In search of general mathematical principles in biology and sociology. Bulletin of mathematical biology.* 1954, Volume 16 number 4,317-348

³³³ Mossio Matteo, Saborido Cristian, Moreno Alvaro. *Fonctions : normativité, téléologie et organisation.* .Gayon Jean, de Ricqlès Armand. *Les fonctions : des organismes aux artefacts.* Science Histoire et société. Paris: Presse Universitaire de France,2010

tant que systèmes matériels, peuvent bien évidemment faire l'objet d'approches relevant de la mécanique (newtonienne) classique, de la physique ordinaire. Dans cette optique elles sont analysables comme systèmes matériels formés d'une famille d'éléments, par exemple de composés organiques. Ainsi les éléments de cette famille définiront un espace des états possibles (représentable par exemple dans un espace de phases) sur lequel on recherchera l'ensemble des interrelations dynamiques. Et pour reprendre le vocabulaire de Rosen, on établira ainsi l'ensemble des déterminations dynamiques qui à partir de l'état N d'un de ces système, connu à un instant « t », le fera dériver vers un l'état N+1 au temps t+dt.

Au rebours de cette approche dynamique et mécanique, Rosen a recherché les déterminations relationnelles qui confèrent sa propriété à une partie ou composant du système ou de l'organisme au sein de l'environnement avec lequel il échange matière et énergie. Cette insertion sera également au fondement du jeu entre déterminations internes, propres au système, et déterminations externes dont les sources procèdent de l'environnement.

La représentation formelle d'un composant du système naturel, ou de l'organisme prend donc en compte son environnement. Dans cet esprit, les influences réciproques entre système et environnement sont représentées par une polarité propre, une asymétrie, ou encore par la présence d'un axe afférent-efférent.

Au départ, l'image formelle du composé proposé par Rosen sera simplement l'application $f: A \rightarrow B$; soit l'application d'un domaine A (les arguments de la fonction sur laquelle opère f) sur un champ B, f portant l'identité du composant. Mais ce que Rosen voudra représenter c'est le mode de détermination de ce composant par le système organisé lui-même et non par son environnement. Dès lors, Rosen modélisera le système ou l'organisme comme un ensemble de composants, représentés chacun par une application spécifique et dont les liens sont figurés par des compositions d'applications, des diagrammes de blocs (ou graphes orientés) etc.

En résumé, la vocation de ce système formel est de représenter (faire image) les structures d'implications ou de déterminations causales présentes dans des systèmes naturels : organismes etc. Les déterminations causales propres au système matériel naturel, et les implications formelles du système formel image, sont ainsi mises en rapport, en relation de congruence.

3.1 Rosen : « Life it self » ou la vie per se

- ***Causes efficientes, causes matérielles, causes finales chez Rosen : Causalité et distinction des plans de détermination.***

Selon Rosen, toute entreprise scientifique consiste à extraire d'un système naturel ses traits essentiels et à les représenter dans un système formel. En découle la nécessité de mettre en relation deux langages, celui qui décrit le système naturel et celui qui le représente au sein d'un système formel. C'est cette mise en rapport de déterminations causales du système naturel avec les inférences logico-formelles du modèle qu'il s'agit de réaliser. Celle-ci, la modélisation au sens de Rosen, conduit à désigner l'ensemble des relations identifiées et représentées au sein des systèmes naturels et formels par un seul terme, celui d'« *entailment* », concept unifiant l'ensemble des relations nécessaires au sein du système naturel et celles de leur représentation formelle.³³⁴

La recherche de ces déterminations au sein des systèmes naturels, leur traduction au sein des modèles, constitue le fil conducteur des interrogations de « *Life Itself* ». Elle conduit Rosen à réinterpréter les causalités identifiées au sein de ces systèmes naturels ainsi que les structures d'inférences présentes dans leurs modèles formalisés. Cette démarche permet de différencier les catégories causales en recourant à une terminologie particulière empruntée aux catégories causales de la métaphysique d'Aristote : causes matérielles, causes formelles, causes efficientes, causes finales.³³⁵ Rosen représente ces catégories causales grâce à une interprétation particulière du formalisme des applications. Ainsi dans l'écriture formelle de l'application « *f* » d'un ensemble « *A* » sur un autre ensemble « *B* » : $f: A \rightarrow B$, soit l'application qui pour tout $a \in A$ fourni une image $f(a) \in B$, « *a* » sera identifié à la cause matérielle produisant un élément « *b* » de *B* et « *f* » à la cause efficiente, ce par quoi « *b* » sera image de « *a* » dans *B*.

³³⁴ Selon les contextes formels ou celui de systèmes naturels analysés en termes causaux, « *entailment* » pourrait être traduit par : déterminations, implications, entraînements, substitutions, inférences... Nous avons pris le parti d'employer systématiquement le terme « détermination. »

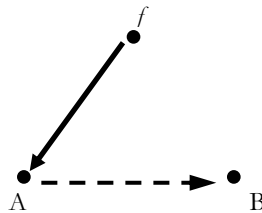
³³⁵ Aristote. *Métaphysique* V.Δ, 1013a-1014a. Traduction de J. Tricot. Edition de 1953

Le schéma relationnel simplifié suivant traduit ce jeu entre ces deux « causes » :

$$\begin{array}{c} f \\ A \rightarrow B \end{array}$$

Afin de rendre l'articulation des divers plans de détermination plus explicite, Rosen dira que l'application qui à tout élément de A fait correspondre un élément de l'ensemble B à travers f , constitue un support d'implication. Dans cet ordre d'idées, le schéma relationnel simplifié peut alors être lu de la manière suivante : « f détermine le fait que a implique $f(a)$ », ou encore : $f \Rightarrow (a \Rightarrow f(a))$

On retrouve sous une autre forme d'écriture les deux types d'implications : a (intransit) comme cause matérielle de $f(a)$ (extrant) et f comme cause efficiente de $f(a)$. Exprimé sous forme de graphe le schéma relationnel simplifié sera le suivant :



- ***Théorie des catégories, diagrammes de blocs et représentation des déterminations causales***

L'outil de formalisation employé par Rosen fait fond sur la théorie mathématique des catégories ou Théorie des Catégories.

- *Eléments de théorie des catégories.*

Il est assez délicat de résumer les fondements et articulations essentielles de la théorie des catégories. Pour faire (essayer) simple on peut dire qu'une catégorie \mathcal{C} est une

collection d'objets A, B, C, \dots et une collection de morphismes f, g entre ces objets.³³⁶ Chaque morphisme possède un domaine et un co-domaine parmi les objets de la catégorie. On peut composer les morphismes à la condition que le co-domaine de l'un soit domaine de l'autre. Ainsi pour deux morphismes f, g si $\text{cod}(f) = \text{dom}(g)$ on peut définir une opération de composition qui respecte les propriétés d'associativité et d'existence d'un morphisme identité: $h = g \circ f$. Un des exemples le plus usuel d'une catégorie, la catégorie « **Set** » est constituée par les ensembles et dont les morphismes sont les fonctions. Une catégorie est donc une structure mathématique très générale, une collection d'objets munie de morphismes entre eux.

On définit également le concept de foncteur d'une catégorie \mathcal{A} dans une catégorie \mathcal{B} comme étant l'application qui à tout objet A de \mathcal{A} associe un objet $F(A)$ de \mathcal{B} , et qui à tout morphisme $f: A \rightarrow B$ de \mathcal{A} associe un morphisme $F(f): F(A) \rightarrow F(B)$ de \mathcal{B} . C'est cette théorie mathématique que Rosen utilise comme outil de modélisation des systèmes vivants.

Rappelons que cette modélisation, sur le plan général consiste à mettre en congruence des structures de détermination de systèmes naturels avec celles de systèmes formels. Cette mise en congruence relève selon Rosen d'un art, l'opération de modélisation ne saurait relever d'un processus causal. En effet, si le respect des lois de la nature garantit que la modélisation ne relève pas de tentatives vaines, cela ne suffit pas néanmoins à fournir le moindre élément de solution à la démarche de modélisation. Celle-ci visera à transformer ces déterminations causales, identifiées au sein d'un système naturel, en relations d'inférences dans un système formel approprié.

En résumé, le modèle développé par Rosen exploitera la syntaxe de la théorie des catégories et une sémantique dans laquelle les relations opérant au sein de l'entité vivante sont caractérisées comme système organisé autour de composants exerçant les fonctions déterminées par leur place et leur rôle au sein du système.

³³⁶Morphisme = famille de transformation, comme des applications entre deux ensembles respectant la structure de ces ensembles.

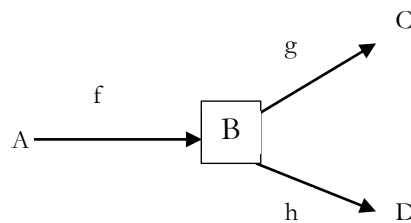
▪ *Retour sur les composants*

Nous avons vu que le composant constitue chez Rosen l'élément de base de la fonction. Il est pensé comme particule élémentaire de fonction du système relationnel. Nous avons vu que son image formelle (en biologie relationnelle) recourt à une application $f : A \rightarrow B$. Celle-ci encode la relation qui lie le composant à son système Ω . Dans cet ordre d'idée, la composition d'application représentera les relations au sein de ce système, dans lequel les composants seront des parties dotées de fonctions spécifiques. L'analyse du système relationnel peut alors être associée à la factorisation d'applications. A l'inverse, c'est la composition d'applications qui permettra de le synthétiser.

Dans ce contexte théorique, Rosen introduit les « diagrammes de blocs abstraits » afin de traduire formellement l'analyse (la décomposition analytique) du système relationnel en factorisation d'applications. Par exemple, le système d'applications suivant (donc l'image de composants exerçant une fonction dans le système global) :

$$f: A \rightarrow B ; g: B \rightarrow C ; h: B \rightarrow D$$

est selon cette démarche représenté par un diagramme relationnel mettant en évidence le point de branchement B.



L'ensemble peut être réduit en une seule application telle que : $\varphi : A \rightarrow C \times D$. Rosen étudiera différentes configurations de ces diagrammes relationnels dans lesquels le domaine d'une application sera le produit cartésien d'autres ensembles, afin de disposer d'un système de représentation qui selon ses propos, permet de mettre à l'écart la

physique pour se centrer sur l'organisation.³³⁷ Ce formalisme doit alors permettre d'accéder à la quintessence des relations entre les composants fondamentaux de l'organisme (vivant), quintessence exprimée au moyen de diagrammes de blocs abstraits.

- *Retour sur le système relationnel et ses déterminations causales.*

Le système formel développé par Rosen a vocation à représenter l'organisation fondamentale des systèmes naturels à travers celle des relations entre composants. Le modèle constitue ainsi une sorte de « monde formel » composé d'ensembles et d'applications, objets de catégories diverses (cf. supra). Ces catégories sont porteuses par leur nature mixte de multiples possibilités logiques d'implications, propres à faire apparaître les structures de déterminations sous-jacentes aux systèmes naturels, notamment aux organismes.

Nous avons vu qu'une simple application, objet d'une catégorie, telle que $f: A \rightarrow B$, sert de support d'implication ou de détermination. Rosen écrira également que pour tout « a » élément du domaine A , « a » étant une application ou un ensemble, le schéma suivant : $a \Rightarrow f(a)$ sert de support d'implication. C'est-à-dire que « a » implique $f(a)$ par le biais de l'application (ou foncteur, ou flèche) f , ce qui comme nous l'avons vu précédemment peut s'écrire : $f \Rightarrow (a \Rightarrow f(a))$. Dans cette relation l'application f détermine le fait que « a » détermine $f(a)$. L'application f et l'argument « a » sur lequel cette application opère sont tous deux nécessaires pour déterminer l'image $f(a)$.

Rosen introduit alors une contrainte permettant de différencier les modes d'implications ou de déterminations internes et externes au sein d'une catégorie. Ainsi, au sein d'une catégorie, seuls les éléments d'ensembles pourront être déterminés sur un mode interne ce qui ne sera pas le cas des ensembles eux-mêmes ni des applications. Ainsi si un élément « b » d'un ensemble B est déterminé, il le sera au motif qu'il est dans le champ d'une application. Cela légitime l'écriture $b = f(a)$.

Le composant encodé par ces implications internes peut dès lors faire l'objet de

³³⁷ « *throwing away the physics and retaining the organization* » (*Life Itself* p. 127).

deux niveaux de lecture causale : « a » comme cause matérielle de $f(a)$ et f comme cause efficiente de $f(a)$.

Du côté des déterminations externes, la théorie des catégories offre la possibilité de construire des applications à partir d'applications au sein de la catégorie et des ensembles à partir d'opérations sur ces ensembles. Ainsi en repartant de la simple série qui comporte deux applications portant chacune une règle d'inférence :

$$A \xrightarrow{f} B \xrightarrow{g} C$$

Ou encore : $f \Rightarrow (a \Rightarrow f(a))$ pour tout a élément de A ; et $g \Rightarrow (b \Rightarrow g(b))$ pour tout b de B . Et ici $b=f(a)$ ce qui permet d'écrire : $g \Rightarrow (f(a) \Rightarrow g(f(a)))$. Et à partir d'un axiome de la théorie des catégories autorisant la composition d'applications : $F(f,g) = g \circ f$. (F est une application dont le domaine et le champ d'application est formé de paires d'applications). Dans ce cas le produit gf peut être considéré comme un effet dont la paire (f,g) serait la cause matérielle et F règle d'inférence, la cause efficiente. Conformément aux conventions d'écritures précédentes on peut alors écrire : $F \Rightarrow ((f,g) \Rightarrow gf)$.

Ce qui importe ici, c'est que F n'appartient pas à la même catégorie que f et g , et conformément aux conventions précédentes n'encode pas de composant. Nous pouvons donc écrire la relation suivante : $(gf) : A \rightarrow C$

- *Modélisation de la cause finale (implication finalisée) à travers les diagrammes de blocs augmentés.*

Repartons du modèle élémentaire de fonction portée par un composant tel que $f: A \rightarrow B$ ou $f \Rightarrow (a \Rightarrow f(a))$. Les plans causaux identifiés par Rosen sont « a » l'argument de f comme cause matérielle et « f » comme cause efficiente. La cause finale n'intervient que lorsque le composant est saisi dans sa relation avec l'organisme. Cela est modélisé (représenté formellement) par le biais de diagrammes de blocs abstraits. (Voir infra).

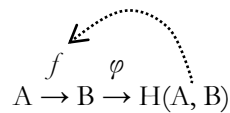
L'approche diffère ici de l'analyse des modes d'organisation recourant aux seules réalisations matérielles, elle la complète. Sous ce rapport, chaque réalisation physique particulière, chaque instanciation d'une organisation dans une structure physique fait en sorte que l'organisation semble comme vissée à la physique du système. Cela conduit à

l'impression que c'est la physique qui détermine cette connexion et non l'inverse. Ce que conteste Rosen, c'est le fait qu'en focalisant l'analyse sur les seules déterminations de l'organisation fonctionnelle par sa structure matérielle, c'est tout un pan de la réalité organisationnelle qui demeure inaccessible. En somme, la thèse centrale de Rosen, c'est que l'organisation détermine la physique.

Rosen réinterprète les différents types de causalité aristotélicienne. Ainsi la « cause finale » d'un effet est définie comme quelque chose qui détermine (ou cause) l'effet produit au sein du système. C'est ce qui explique en quoi ce type de cause résiste à ce que Rosen appelle l'« encodage newtonien ». Les modélisations empruntant à ce principe sont réalisées à partir d'implications ou de déterminations reposant sur la récursivité des transitions de séquences d'état. Or dans un espace d'état, la succession des états ne peut s'inscrire que dans une séquence temporelle qui dès lors rejette nécessairement la « cause finale » comme simple vue de l'esprit, car bien évidemment sous ce rapport le futur ne peut en aucun cas agir sur le présent. Cette approche conduit nécessairement et évidemment à l'affirmation d'inconsistance de la « cause finale » avec les autres types de causes du paradigme Newtonien.

En complément, l'approche relationnelle permet de mettre en évidence les nouveaux modes de détermination liés à la présence de l'organisme. Dans le paradigme relationnel il n'y a pas de paramètre de temps, pas d'états, pas de transitions de séquences d'états. Il n'y a que des composants (des applications) ainsi que l'organisation représentée par des diagrammes de blocs abstraits. Ce mode de représentation rend alors possible l'analyse d'autres implications, indépendantes des modes d'implications ou de déterminations matérielles et efficientes. Il s'agit notamment d'implications ou de déterminations fonctionnelles. Celles-ci ne sont évidemment pas encodables avec les formalismes de la physique classique. L'accent mis sur ces modes d'implications fonctionnelles permet alors de saisir les caractéristiques de base (essentiels) de l'organisation matérielle « *per se* ». Et ce jeu entre deux plans d'analyse, l'un matériel, l'autre fonctionnel, introduit à la possibilité d'une non réduction de la biologie à la physique, tout en restant consistante avec les lois de la nature.

Sur le plan formel, l'incorporation du composant dans un diagramme de bloc plus large le dote d'une capacité à déterminer « quelque chose », notamment l'argument « *a* » de la fonction f et éventuellement l'application elle-même. $f(a)$ peut alors être dotée de nouvelles fonctions, ce qu'illustre le diagramme suivant :



Dans ce diagramme, $f(a)$ avec a , argument de f , détermine quelque chose sous la forme suivante :

$\varphi \Rightarrow (f(a) \Rightarrow f)$ ou encore $\varphi(f(a)) = f$ (\Rightarrow étant le symbole d'implication ou de détermination causale)

L'ingrédient nouveau dans ce diagramme réside dans l'application $\varphi: B \rightarrow H(A, B)$, ainsi que dans la flèche en pointillé par laquelle φ détermine l'application originale f , elle-même support de plusieurs types de déterminations. f est ainsi support de la « cause efficiente », et son intégration dans un diagramme de bloc augmenté lui permet via $f(a)$ d'être également support de la « cause matérielle » de φ . Et vu sous l'angle de la « cause finale », elle peut également être analysée à travers la boucle de retour, comme possédant une fonction, un rôle : rendre possible le processus modélisé par le diagramme.

La fusion entre fonction et détermination de type « cause matérielle » se produit toutes les fois que nous aurons une boucle dans un « diagramme de bloc augmenté », présenté par Rosen comme un accroissement du degré d'organisation. Ce type de représentation formelle est intimement lié à la vie elle-même, et n'est accessible qu'à travers l'approche relationnelle.

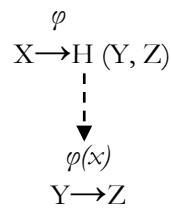
Le recours à la théorie des catégories permet d'encoder ces déterminations multiples sans risques d'inconsistance. Rappelons qu'en l'absence de cette théorie, on travaille dans le cadre d'une séparation absolue entre ensembles (domaines et champs d'applications) et applications. Et seuls alors les éléments d'un ensemble peuvent être déterminés dans des diagrammes de blocs abstraits (causes matérielles, causes efficientes), ils sont soit champ d'application (intrans), soit extrant d'un composant (fonction). Mais avec la théorie des catégories, on dispose de l'outil formel autorisant à représenter la détermination de l'application elle-même et à encoder l'effet qu'elle produit. Sans cet outil, elle ne pouvait qu'être donnée ou encore construite à partir d'autres applications dans une sorte de régression à l'infini. La théorie des catégories permet de casser cette limitation. Ainsi si A et B sont des applications, alors la totalité des applications de A sur B , soit H

(A, B) est un ensemble appartenant à la catégorie contenant A et B . $H(A, B)$ peut dès lors devenir le champ d'application d'autres applications, et pourra en conséquence porter de ce fait les mêmes déterminations internes que celles précédemment exposées.

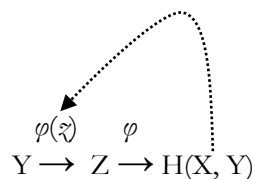
- *Augmentation du degré d'organisation.*

Ce paragraphe a pour objet de présenter le développement des diagrammes de relations du type: $\varphi : X \rightarrow H(Y, Z)$.

Dans cette relation X, Y, Z sont des ensembles arbitraires d'une même catégorie. $H(Y, Z)$ désigne l'ensemble d'applications de Y sur Z (qui dans l'approche de Rosen a vocation à représenter un composant). φ encode un composant, et pour tout x élément de X détermine une image $\varphi(x)$ dans l'ensemble $H(Y, Z)$. Cette image $\varphi(x)$, est également une application qui pour tout élément y de Y détermine un nouvel élément ($\varphi(x)(y)$) dans Z . Pour représenter cela dans le formalisme des diagrammes de blocs abstraits, Rosen recourt à une nouvelle notation introduisant la possibilité que l'application « élément » d'une catégorie peut être déterminée par une autre application :



Et $\varphi(x)$ en tant qu'application de Y sur Z est elle-même produit de sortie de l'application φ . C'est donc dire qu'il existe un élément x de X qui déterminera, via φ , l'application $\varphi(x)$ de Y dans Z . Ces diagrammes de blocs abstraits sont appelés par Rosen « diagrammes de blocs augmentés ». Et dans le cas où X est identifié à Z (identité des deux ensembles) on aura encore:



Ce type de diagramme représente selon Rosen le système relationnel le plus

organisé possible. Il contient un minimum d'ensembles et un maximum de « flèches » ou de déterminations et donc un minimum d'éléments non déterminés.

Le fait que des applications jouent à la fois le rôle d'entrée et de sortie pour d'autres applications, que les domaines et champs d'une application sont eux-mêmes des ensembles d'applications, permet de modéliser le rôle causal de certains des composants d'un système. On pourra par exemple représenter des relations du type :

$$Y \xrightarrow{\varphi(z)} Z \xrightarrow{\varphi} H(Y, Z) \xrightarrow{\beta} H(Z, H(Y, Z))$$

Dans cette relation β est également un ensemble d'applications ou encore de composants. Ici encore on représente une structure d'organisation maximale (au sens de Rosen) puisque le ratio d'éléments non déterminés est plus faible encore que précédemment. Ce processus peut être itéré indéfiniment, conduisant à une structure de plus en plus organisée dont la proportion d'éléments non déterminés tendra vers zéro.

Pour qu'une telle structure représente un organisme, il suffit alors d'organiser la clôture des déterminations efficaces (les applications). (Voir 3.1.1)

3.1.3 Le modèle « M, R » et son exploitation en biologie.

Au-delà de l'aspect théorique et fondationnel revendiqué par Rosen, il est intéressant d'examiner l'exploitation de ce modèle par la biologie et voir comment un modèle radicalement abstrait a su rencontrer la biologie telle qu'elle se pratique.

De prime abord le but visé par ce modèle est moins de disposer d'un outil de simulation permettant d'imiter tel ou tel aspect des manifestations du vivant que de définir et caractériser ce qui constitue l'essence relationnelle de l'organisation vivante. Nombre d'auteurs ont donc retravaillé le modèle afin de l'interpréter et le rendre compatible avec les concepts de la biochimie du vivant tels qu'ils ressortissent aux connaissances actuelles.

L'interprétation biologique dominante fait fond sur la présence d'un système catalytique, enzymatique, dans tout organisme depuis le plus simple jusqu'au plus complexe. Ce système présent et nécessaire dans la mise en œuvre de toute opération se déroulant au sein de l'organisme vivant, est généré et reconstitué par le système vivant lui-même durant toute sa durée de « fonctionnement ».³³⁸ Cependant le lien avec les concepts mobilisés en biologie reste délicat à établir. Définir un composant à partir du concept d'application engage à un travail d'abstraction à partir des composantes et sous-ensembles réels rencontrés parmi les vivants concrets.

L'interprétation biologique proprement dite d'un système « M, R » avec les systèmes moléculaires réels, met en jeu plusieurs niveaux d'interprétations. On passe d'une expression purement formelle, celle des relations mathématiques et de leurs interprétations logico mathématiques (les ensembles, les fonctions) graduellement et par niveaux de dés-abstractions, aux niveaux de description classiques de la biologie moléculaire. Dans cet ordre d'idée, il s'agira alors de faire coïncider, ou mettre en congruence le système naturel décrit par la biologie et le modèle « M, R » abstrait. On réalise ainsi un processus inverse à celui entrepris par Rosen. A l'inverse de l'encodage du système naturel dans un système formel on opère le « décodage » du système formel afin de retourner au système naturel (voir infra un commentaire sur la modélisation selon Rosen).

Le concept d'invariance organisationnelle, c'est-à-dire la forme relationnelle prise par un système pour se maintenir en l'état, rend possible de spécifier les contraintes imposées à certaines classes de molécules entrant dans la « réalisation du système « M, R » ».³³⁹ Cette opération, comme retour vers la matérialité du système naturel, s'apparente à une forme de réification, un retour vers la matérialité de l'organisme vivant pour y

³³⁸ - Cornish-Bowden Athel ; Cardenas Maria Luz. Organizational Invariance in (M, R)-Systems. *Chemistry and Biodiversity*.2007,Vol. 4

- Cardenas Maria Luz, Letelier Juan-Carlos, Gutierrez Claudio, Cornish-Bowden Athel,Jorge Soto-Andrade. Closure to efficient causation, computability and artificial life. *Journal of Theoretical Biology*. 2010

- Gutierrez Claudio, Sebastian Jaramillo, Soto-Andrade Jorge. Some Thoughts on A. H. Louie's "More Than Life Itself: A Reflection on Formal Systems and Biology". *Axiomathes*, 2010

³³⁹ Cornish-Bowden Athel, Cardenas Maria Luz. Self-organization at the origin of life. *Journal of theoretical biology*. 2008, 252 : 411-418

retrouver des déclinaisons concrètes, réelles, de ce qui avait été abstrait du réel dans le mouvement d'encodage. Et ce retour conduit à une modélisation du réel vivant qui bien évidemment ne coïncide pas totalement avec les systèmes naturels originels.

Ce qui relève de l'ordre de l'abstraction pure rencontre alors une réalité biologique avec le potentiel catalytique de certaines des molécules insérées dans des cycles chimiques, leur capacité à assurer des fonctions différentes, à participer à plusieurs réactions chimiques tout en retournant à l'état initial à la fin des réactions dans lesquelles elles sont impliquées. (Systèmes auto catalytiques).

Dans un article récent, les auteurs précédents³⁴⁰ développent cette interprétation sur un plan plus proche du formalisme adopté par Rosen en recourant au langage de la biochimie. Ils notent d'abord qu'il ne peut y avoir de symétrie entre cause efficiente et cause matérielle. Cette dernière doit, en raison de contraintes thermodynamiques, être asymétrique (traduisant d'ailleurs le fait qu'il n'y a pas de clôture sur cause matérielle dans un système « M, R »).

Ainsi dans la relation :



le « métabolisme » au sens de Rosen est traduit comme étant l'ensemble des réactions de transformations chimiques $A \rightarrow B$ catalysées par l'ensemble f des enzymes nécessaires à ces transformations.

La fonction « réparation » de Rosen, ou selon certains auteurs de « remplacement », est interprétée comme étant l'ensemble des processus rétablissant les capacités du système enzymatique afin de maintenir la capacité de transformation de l'organisme.

La fonction réplique permet de garantir l'invariance de l'organisme. C'est donc

³⁴⁰ Cardenaz Maria Louis, Letelier Juan-Carlos, Gutierrez Claudio, Cornish-Bowden Athel, Soto-Andrade Jorge. Closure to efficient causation, computability and artificial life. *Journal of Theoretical Biology*, 2010 : 79-92

le processus global qui permet à un organisme de maintenir à l'identique son système de remplacement. (Cela ne correspond donc pas directement à la reproduction cellulaire ni à la réplication de l'ADN). Il est alors aisément compréhensible que l'ensemble des enzymes doit être synthétisés à partir des produits du métabolisme, cette synthèse nécessitant également une catalyse.

La clôture sur cause efficiente est au final interprétée comme étant la clôture du système catalytique, les catalyseurs (enzymes) étant synthétisés au sein de l'organisme. L'interprétation du système « M, R » mobilise deux niveaux d'analyses, celui des causes matérielles, celui des causes efficientes, permettant de saisir l'action de certains composés comme les enzymes, selon deux catégories causales. Ainsi celle qui relève de la cause « matérielle » les inscrit dans le cycle de réactions chimiques qui les produisent, et l'autre « efficiente » les analyse sous l'angle de leur activité catalytique. Ce point fait l'objet de débats, ainsi Chemero et Turvey analysent la clôture catalytique par le fait que chaque produit d'un système est également catalyseur du système.³⁴¹ Ce qui fait consensus, c'est que pour constituer un système M, R, modèle des organismes vivants, tout catalyseur doit être le produit d'un métabolisme.

3.1.4 Questions philosophiques autour du modèle « M,R ».

- *Mécanisme, machines et organisme.*

Le modèle développé par Rosen inscrit le concept de vie comme étant la propriété d'un système matériel clos sur la cause efficiente. Il fournit un fondement théorique à la biologie qui devient alors la science des classes de systèmes matériels réalisant ce modèle. La biologie acquiert un statut équivalent à celui de la physique en produisant les fondements de sa science. Rosen, renouvelle sur un plan théorique la thématique de l'irréductibilité du vivant aux principes physiques de la matière élémentaire non organisée. Mais ici, l'irréductibilité affirmée sur le plan épistémologique, comme impossibilité à

³⁴¹ Chemero A., Turvey M.T., *Complexity and closure to efficient cause*. In : Ruiz-Moreno, K., Barabdiaran, R. (Eds). *ALIFE X : Workshop on Artificial Autonomy*. MIT Press. Cambridge MA. , 2006, pp13-18

rendre compte dans un même plan d'analyse de l'enchaînement de séquences matérielles et des contraintes opérées par l'ensemble dans lequel elles se déploient, maintient l'organisme comme un objet physique taillé dans la même étoffe que la matière non vivante. Elle acte l'existence d'une nouvelle classe d'objets matériels, singuliers : les organismes, et a chez Rosen comme conséquence épistémologique l'impossibilité de simuler l'organisme à partir de modèles mécaniques de type machine.

Ainsi, le monde non organisé, relèvera du seul mécanisme alors que l'organisé (celui des vivants) s'en différenciera par la nécessité de disposer d'une dimension causale supplémentaire rendant compte de la clôture de son système matériel. Mais ce monde organisé procèdera toujours et nécessairement du premier : continuité matérielle et différenciation des principes d'organisation impliquant chez Rosen l'opposition fondamentale entre organisme et système mécanique. L'organisme vivant nécessite un nouveau type de modèle explicatif, relationnel, fondamentalement différent de celui des systèmes mécaniques.

Cependant machine et organisme restent éligibles aux descriptions relationnelles. Ces systèmes admettent des représentations en termes de graphes orientés dans lesquels les sommets (nœuds) représentent les composants du système et les différents arcs reliant ces sommets en seraient les relations de déterminations. Organisés en composants exerçant des fonctions déterminées, ils présentent une apparence de finalité.

Néanmoins la « cause finale » des systèmes de type « organisme » diffère des autres causes. Ces dernières décrivent les chemins d'implications menant à un effet, alors que la cause finale apparaît comme une détermination, une nécessité procédant seulement de l'effet produit. Cela prend à rebours les fondamentaux de la mécanique qui reposent sur le principe que la cause ne peut anticiper ses effets (Dépendance au temps). D'où l'intérêt de la description relationnelle qui permet de s'affranchir de cette contrainte temporelle. Le temps n'intervenant pas, l'analyse du système peut alors légitimement affirmer qu'un composant résulte ou est conséquence de la fonction qu'il exerce (Voir supra). Et c'est

grâce à l'analyse du rôle et des contraintes portées par les composants de la machine d'une part et de ceux de l'organisme d'autre part, grâce à la mobilisation aux fins d'analyse de leurs plans causaux, que Rosen montre que les schémas relationnels d'une machine et d'un organisme diffèrent radicalement.

En résumé,³⁴² une machine est caractérisée fondamentalement par un ensemble de composants dont le modèle formel est constitué de la sommation d'états disjoints. Toute machine, quel qu'en soit la complexité pourra d'ailleurs en droit, être décrite comme un ensemble formé de ces éléments sommables. Cela n'est cependant plus réalisable dans un système du type « organisme ». Cela résulte du fait que les propriétés des composants qui le constitue ne procèdent pas uniquement de leurs caractéristiques intrinsèques, mais également de leur rôle et place dans l'organisme. Rosen résume ce constat par l'affirmation de la non fractionnabilité des composants de l'organisme.

A la question du pourquoi de la présence d'un composant « f », la réponse sera identique sur le plan des « causes efficientes » entre systèmes mécaniques et organismes. Dans les deux systèmes un autre processeur, « Φ », déterminera (ou sera cause de) « f ». Mais avec la machine, la cause de la fonction reste externe et dévolue à l'environnement du système. Il en sera de même sur le plan de l'analyse en termes de « cause finale ». Car ici, à la question du pourquoi « Φ » la réponse sera : Φ doit être la cause de f , et alors non seulement la cause efficiente est comme exportée dans l'environnement du système mais également sa cause finale.

Néanmoins, Rosen ne rejette pas la possibilité de descriptions partielles de l'organisme par des modèles mécaniques. Ce système reste partiellement modélisable par des modèles mécaniques propres à en analyser tel ou tel de ses traits, de ses propriétés, de ses modalités de fonctionnement. Mais la sommation de l'ensemble de ces modèles partiels, ne pourra selon Rosen être modèle de l'organisme dans son entier.³⁴³

³⁴² Voir les chapitres 8 et 9 de Rosen R. « *Life Itself* ». Déjà cité.

³⁴³ Est-il concevable, par ailleurs, de modéliser un organisme comme limite d'une sommation à l'infini de modèles partiels ? Et sauver par là une conception mécaniste de la vie ?

Au fond, c'est ce qui différencie machine et organisme, ce système matériel ne pouvant structurellement être modélisé par un système mécanique dont le modèle générique est la machine de Turing, machine mathématique. Rosen affirme par là même que par principe, un organisme ne peut être simulable. (Voir infra)

Le mécanisme, la machine, reste donc au centre de l'analyse menée par Rosen. Par machine il ne s'agit pas uniquement de réalisations physiques faites de pièces matérielles en mouvement les unes par rapport aux autres, ou encore d'un système matériel qui serait fait de composants dont le fonctionnement serait déterminé par la succession (temporelle) de changements d'états. Sur le plan le plus abstrait, c'est le calculateur universel de Turing qui constitue pour Rosen le modèle universel des systèmes mécaniques réels. Cela permet d'ailleurs de spécifier une classe de systèmes naturels qui diffèrent sur un plan essentiel des organismes : les machines sont un mécanisme dont un des modèles est une machine mathématique, une machine de Turing³⁴⁴. Leurs modèles seront donc simulables.

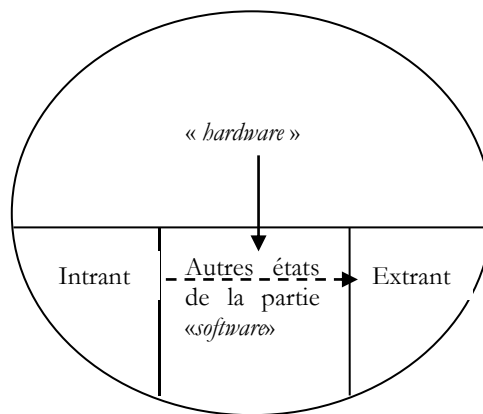
Ainsi, sur un plan général un système N relève de l'approche mécanique (analysable selon ses mécanismes) s'il dispose de la propriété suivante : posséder un modèle étendu consistant en un ensemble d'états muni d'une règle de récursion qui déterminera les états ultérieurs à partir de l'état présent. Tout autre modèle plus « petit » en dérivera à partir de moyens formels. Ces systèmes mécaniques peuvent faire l'objet d'analyse scientifique à l'image de l'étude des systèmes naturels. Et dans cette perspective, les machines sont des systèmes naturels dont les modèles sont simulables et dont au moins un est une machine mathématique.

Cependant Rosen a réinterprété le modèle de machine mathématique, la machine de Turing, pour y distinguer un « *software* » et un « *hard ware* »³⁴⁵ et articuler ces deux distinctions avec les interprétations retenues des causes formelles, matérielles et efficientes. Ainsi le « *hardware* » de la machine mathématique sera constitué par le

³⁴⁴ Rosen, *Life Itself*. Page 203

³⁴⁵ On conservera la terminologie anglo-saxonne et non leur traduction en logiciel et matériel. Chez Rosen ces deux termes font l'objet d'une interprétation particulière ne recouvrant pas les différences traditionnelles employées en informatique entre le « soft. » ou programme et le « hard. » ou support physique supportant et exécutant les instructions du programme.

processeur opérant le « *software* ». Le concept retenu ici du « *hardware* » exprime alors l'idée d'un état de quelque chose qui détermine ou induit le flux allant des intrants vers les extrants. Intrants, extrants etc. participent du « *software* ». Ils constituent l'environnement futur du « *hardware* », ce qui va être incorporé dans le processus ; les extrants sont ce qui a déjà été traité dans le processus. Celui-ci gère des flux, indexés temporellement, d'intrants vers des extrants, donc des flux d'éléments afférents vers des éléments efférents. Ce sous système est polarisé. La machine mathématique est décrite dynamiquement comme étant la spécification par un algorithme, des récursions d'un état ultérieur à partir de l'état actuel : f_{n+1} est déterminé par f_n . Chaque état de la machine peut dès lors être décomposé de la manière suivante :



Rapporté à la machine de Turing, le « *hardware* » correspond à la tête de lecture, les intrants à tout ce qui se situe à un instant donné, sur la bande de lecture à la gauche de la tête de lecture, les extrants à tout ce qui est situé au même moment à la droite de la tête de lecture. Les autres états de type « *software* » correspondent au symbole en cours de lecture.

La relation $f: A \rightarrow B$ représentation d'un composant $A \rightarrow B$ est dissymétrique, polarisée. Le temps y intervient implicitement. On présente l'essence de la structure relationnelle modèle d'une machine, la représentation sous forme de flèche pleine participant de la cause efficiente et le flux allant de A à B participant de la cause matérielle. Ce formalisme autorise la décomposition en composants (chacun représentable par un

diagramme relationnel élémentaire) sous certaines conditions (extrants de l'un devenant l'intrant de l'autre). A partir de là, dire qu'un système naturel a pour modèle une machine mathématique conduit à affirmer quelque chose sur les structures causales dans ce système. (Ou du moins sur la partie du système naturel qui est encodée (et encodable) par une machine mathématique).

L'essence du mécanisme apparaît dans la récursion des séquences de transition d'états : c'est l'état présent d'un système mécanique qui détermine son état ultérieur. Par exemple, l'état d'un système « S » à un instant « t » sera $s(t) = (\dots, x_{n-1}(t), x_n(t), x_{n+1}(t), \dots)$ qui déterminera $s(t+1)$. L'état $s(t)$ dépend dès lors causalement de l'état initial $s(t_0)$ et permet de proposer comme réponse à la question : « pourquoi $s(t)$? », parce que $s(t_0)$.

Si le système naturel est une machine, une partition en « hardware » et « software » se surimpose au mécanisme. Elle permet de modéliser en blocs séparés les états du mécanisme (les « $s(t_i)$ »). La structure causale des systèmes exprime alors les relations entre ces blocs disjoints. Comme indiqué précédemment, la cause efficiente est pour ainsi dire incorporée à la partie (bloc) « *hardware* » de la machine, et la cause matérielle dans la partie « *soft ware* » (ce qui peut paraître contre intuitif mais reste cohérent avec les définitions de *hard* et de *software* données par Rosen). La différenciation des états du mécanisme au sein de la machine peut être étendue et développée afin d'y incorporer une cause formelle. Elle représente la séquence des programmes incorporée dans la partie « *soft ware* ». Sur le mode le plus abstrait, Rosen définira la machine comme un système mécanique dont l'essence repose sur la capacité à être analysée en états différenciés, en « *hardware* » et « *software* », à être représentés en blocs organisés.

Sur un autre plan, la fractionnabilité d'un système sera le corollaire de l'organisation en machine, traduction de sa potentialité à être décomposée en parties dont l'assemblage, la juxtaposition et sur un plan formel la sommation des parties élémentaires, caractérisent les principes mécaniques qui lui sont applicables.

La modélisation d'un système naturel en machine mathématique a une conséquence importante. Elle détermine une limite essentielle dans la capacité du modèle à traduire formellement les structures causales du système. Dans le modèle « machine » les catégories causales sont ségréguées en structures disjointes. En terme de graphe, on montre que par ce mode de représentation il devient impossible de concevoir des chemins

causaux totalement déterminés au sein du système lui-même, et ils ne le seront que de l'extérieur du système. Il rend impossible l'analyse du système en terme de cause finale.

En retour et par différence, cette limite permet de spécifier le propre de l'organisme. L'organisme en tant que système naturel est modélisable par un modèle relationnel dont tous les éléments sont déterminables au sein même du système. L'organisme diffère sur ce plan de la machine. Celle-ci, sur le plan de l'analyse relationnelle comportera des parties dont les éléments sont déterminées à l'extérieur du système. Pour modéliser un organisme de manière pertinente, il sera nécessaire de prescrire des contraintes sur les sous-ensembles qui le constituent, en imposant une clôture sur causalité efficiente.

- ***Modèles, Lois, simulations***

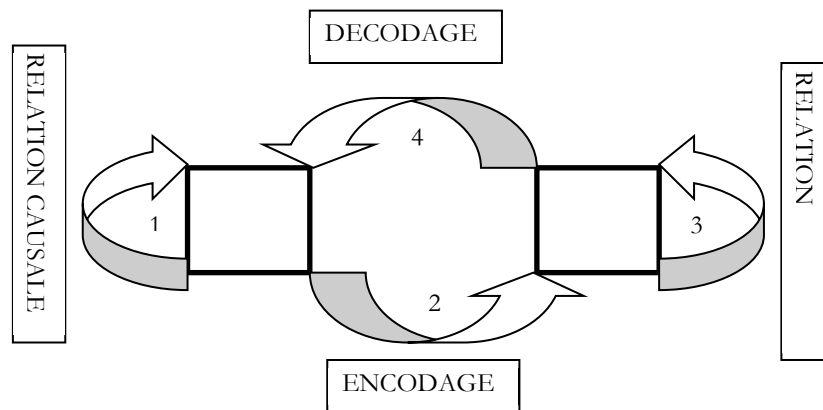
Modéliser, c'est donc mettre en congruence les déterminations causales de systèmes naturels du Monde avec les déterminations inférentielles d'un système formel ou modèle. Cette approche emporte également une redéfinition du concept même de Loi Naturelle. Dans cet esprit, celle-ci procède d'une relation de modélisation entre déterminations causales du système naturel et les inférences syntactiques du système formel qui le modélise. Cette démarche met en rapport un moi, un *self*³⁴⁶ et son environnement selon les modalités suivantes :

- La succession d'évènements ou de phénomènes perçus dans l'environnement n'est pas totalement arbitraire, dénué de sens ; elle constitue les relations causales du monde des phénomènes.
- Les relations entre phénomènes qui viennent d'être postulées sont au moins partiellement perceptibles et compréhensibles par l'esprit humain, par le « moi » pensant.

Dans cet ordre d'idée, la science devient l'art de la mise en correspondance, à travers un modèle, des relations causales d'un système naturel avec les relations

³⁴⁶Acception à prendre sur le plan du collectif de l'humanité scientifique.

d'inférences constitutives du système formel. Ce qui est donc au cœur des démarches scientifiques, c'est la recherche des correspondances entre systèmes de déterminations naturels et formels. Le schéma général de cette mise en relation est figuré de la manière suivante :³⁴⁷



La modélisation selon Rosen

Dans ce schéma, la flèche 1 représente les déterminations causales du système naturel N « perçues » par un « observateur ». Cette vue n'est pas uniquement construite à travers les sens, mais par ce que l'état des sciences à un moment donné permet d'identifier comme formant les relations causales au sein du système naturel N.

La flèche 2 est associée à la notion de mesure du processus. Elle associe un nombre à un évènement ou à un phénomène de N. Ici chaque acte de mesure est déjà un acte d'abstraction qui remplace le phénomène, l'évènement, par un ensemble de nombres. Cette flèche représente l'encodage du phénomène de N en propositions du système formel F. Ces propositions sont intégrées pour former les hypothèses nécessaires à l'élaboration du système inférentiel de déterminations logico-formel dans F, schématisé

³⁴⁷ Rosen. *Life itself*, p 60

par la flèche 3. Ce système inférentiel est au fondement des théorèmes applicables à F.

La flèche 4, permet de décoder ces théorèmes en prédictions sur N. Il s'agit de fait d'une opération de dés-abstraction qui associe en retour, à une proposition dans F un phénomène dans N. Il ne s'agit pas de l'opération symétrique à celle schématisée par la flèche 2

Néanmoins ce que l'on recherche c'est que ce diagramme commute, c'est-à-dire que le chemin (2) +(3) +(4) fournit les mêmes résultats que le chemin (1). Dans ce cas, le système formel qui représente l'ensemble de ces relations, constitue un modèle de N. Dans la démarche inverse, N constitue une réalisation de F. Ce qui signifie que l'on pourrait partir de F et de son système d'inférences pour rechercher quels types de systèmes naturels réaliseraient ce modèle.³⁴⁸

Rosen note que tant que l'on reste sur un plan général, ne spécifiant par les modes de déterminations, le schéma est acceptable par toutes les communautés scientifiques. Mais dès lors que l'on souhaite y réintroduire ce qui ressemble à une « cause finale » ou simplement la finalité qui n'est pas traitée par la physique et l'arsenal scientifique « traditionnel »³⁴⁹ les difficultés apparaissent. La non prise en compte de la finalité dans cette physique pose problème à la biologie en rendant délicate les formalisations théoriques et les réflexions sur l'origine de la vie.

Par ailleurs, il faut noter qu'il n'y a pas de bijection entre « N » et « F ». D'une part F peut renvoyer à plusieurs systèmes naturels, (cela fonde d'ailleurs la possibilité d'analogies valides, ce qui peut être le cas en biologie avec les analogies entre machines et organismes, organismes et systèmes sociaux). D'autre part, un système naturel pourra être modélisé par plusieurs systèmes formels différents. Dans ce contexte, Rosen définira la réduction comme la recherche de la classe de tous les formalismes F modèles de N ainsi que l'identification de la structure formelle d'une telle classe.

³⁴⁸ Cette démarche est intéressante pour aborder les problématiques de vie artificielle. La vie « *in-silico* » rejoint les démarches qui visent à élaborer une théorie du vivant puis à s'interroger sur le type de système naturel, matériel qui dans cette perspective constituerait une réalisation du système théorique.

³⁴⁹ Rosen emploie le terme *contemporary*.

On introduit ainsi une distinction forte entre modèle, modélisation et simulation. Classiquement la simulation est attachée à la possibilité de développer un programme qui permet de reproduire c'est-à-dire faire apparaître comme semblable ou encore à mimer le phénomène. Mais cela n'entraîne pas nécessairement la connaissance de la structure du phénomène. Une autre façon d'envisager la simulation consiste à acquérir des informations sur la structure même du phénomène étudié, et jouer sur les variables du modèle afin de simuler le phénomène en question. Le calculateur, la calculabilité devient alors une question centrale au cœur de la simulation.

Pour Rosen la simulation met en jeu les relations entre deux systèmes de représentations formelles F2 et F1, entre d'une part le programme d'un calculateur, (qui sur un plan abstrait est une machine de Turing) et d'autre part l'ensemble de propositions d'inférences logico-formelles modèle du système naturel N. La notion de simulation est donc ici intimement liée au concept de machine développé par l'auteur de « *life itself* ». Fondamentalement une machine sur le plan théorique réfère à la fois à un certain dispositif matériel (voir les métaphores horlogères) ainsi qu'à un certain formalisme (ce qui explique qu'une machine en tant que système formel peut modéliser un système naturel, c'est-à-dire un dispositif matériel donné). Ce formalisme est porté par la théorie des machines de Turing. Dans ces « machines mathématiques » pour reprendre l'expression de Rosen, les symboles sont comme les images des rouages, les règles de manipulation des symboles représentant les roues dentées et les ressorts, les dispositions et arrangements de ces règles formant le programme et l'algorithme. Par construction, un tel système formel est pour Rosen un simulateur. Simuler c'est finalement le fait de pouvoir utiliser une machine de Turing.

Rosen en tire une conclusion importante. Un formalisme est simulable si sa structure d'inférences est exprimable par le programme d'une machine mathématique. En découle qu'un système naturel est un mécanisme si et seulement si tous ses modèles sont simulables. A contrario l'organisme, dont le modèle est un système « M, R », ne peut être simulé. Faut-il en conclure que le modèle (M, R) développé par Rosen, s'il capte une

structure essentielle de l'organisme vivant, ne permet pas de simuler la vie ?

Avec cette approche Rosen renouvelle ou revisite l'affirmation philosophique d'irréductibilité de la vie aux phénomènes physico chimiques qui la sous-tendent.³⁵⁰Cependant l'approche demeure matérialiste, au sens où l'auteur de « *Life Itself* » affirme l'unicité matérielle du monde, et ne fait pas appel à des lois extra mondaines, à une force vitale. L'accent est mis sur l'organisme en tant qu'il manifeste un ensemble de propriétés dont la liste constituée avec les sciences de la vie, obéit à un principe de composition, « la clôture sur cause efficiente ». Ce principe en fait un système matériel échangeant avec l'environnement et qui obéit à une caractéristique essentielle du point de vue de l'analyse en terme de cause efficiente : sa clôture sur lui-même garantissant sa permanence en tant qu'organisme. Et cet organisme, en tant que « tout » échappe alors à toute tentative de simulation via des analogues mécaniques.

La modélisation d'un système « organismique » obéissant à la contrainte de « clôture sur cause efficiente » a donc pour corolaire sa non simulabilité. C'est une des conséquences de l'analyse qui conduit à affirmer que l'organisme n'est pas une machine au sens où il ne peut exister d'algorithme porté par un calculateur universel (une machine de Turing) qui aboutisse en un nombre d'étapes de calcul fini, à un résultat (un état stable de la machine universelle). Formulé autrement, aucun modèle de clôture sur « causalité efficiente » ne serait « Turing-compatible ». Ce point a fait l'objet d'un débat vigoureux. Ainsi Stewart et Mossio, dans une série d'articles et de communications^{351,352}montrent qu'un modèle de type « clôture sur cause efficiente » serait simulable à travers un traitement via le lambda calcul.³⁵³Ce dernier point mérite d'être signalé, car le lambda calcul peut être interprété (aspect sémantique de la syntaxe propre à ce formalisme) de

³⁵⁰ On peut penser à Bergson dans « l'évolution créatrice », mais aussi à Hans Jonas ou Raymond Ruyer.

³⁵¹ Stewart J., Mossio M., Is « Life » Computable? On the simulation of closure under efficient causation. In *Proceedings of the Fourth International Conference on Enactive Interfaces*, 2007

³⁵² Mossio M., Longo G., Stewart J., A computable expression of closure to efficient causation. *Journal of Theoretical Biology*. 2009

³⁵³ Il est assez délicat de donner une définition simple du λ -calcul créé par Alonzo Church en 1930. Nous retiendrons que le λ -calcul vise à formaliser la notion de fonctions avec une particularité, toutes les fonctions du λ -calcul ont un unique domaine et co-domaine qui est l'ensemble des termes du λ -calcul lui-même. On peut ainsi appliquer une fonction à elle-même. Voir à ce sujet : Schiex Thomas, λ -calcul dans « *Intelligence artificielle et informatique théorique* ». Toulouse, Cepadues-Editions, 2002.

telle sorte qu'une même entité joue le rôle d'argument (intrants d'une application), de résultat (extrants de l'application) et de fonction (l'application elle-même), et s'accorde à la richesse de la théorie des catégories. Cependant cette affirmation a été contestée par Cardenas et al. (2010) sur deux points : d'une part la définition de la computabilité employée par Mossio et al. (2009) ne nécessiterait pas la terminaison d'un programme en un nombre fini d'étapes et d'autre part, l'interprétation de la fonction « réplication » serait trop restrictive. Au final ces auteurs concluent également à la non simulabilité de la théorie abstraite du système (M, R) dans laquelle l'application de réplication serait parfaite, pour la différencier des interprétations en termes de processus physique dont les équations dynamiques en constitueraient une interprétation et seraient simulables.

L'enjeu de ce débat est clairement la possibilité de simuler la vie dans tous les essais de constitution de modèles de vie « *in silico* » développés dans les approches de la vie artificielle.

- ***Causes***

Il semble nécessaire de revenir sur l'interprétation donnée par Rosen aux quatre causes en référence à la métaphysique aristotélicienne et réinterprétées par toute une tradition philosophique scholastique afin de saisir la complexité des déterminations causales du monde. Quatre acceptions permettent d'en rendre compte. Ce à partir de quoi une chose est faite, la matière ou le substrat, sera la cause matérielle. La forme qui correspond à la raison d'être des choses sera traduite en cause formelle, le premier principe de changement ou cause mécanique deviendra la cause efficiente et enfin le *telos*, la fin deviendra la cause finale.

Ce rappel, pour indiquer que moins qu'une reprise directe aux sources de la métaphysique aristotélicienne c'est sur l'interprétation livrée par la scholastique que Rosen fonde sa différenciation en cause matérielle, formelle, finale, et efficiente. Ce qui est commun, est moins le souci d'articuler la recherche de causalité sur un a priori renvoyant aux fondements ultimes de toutes choses (la cause ultime), que de l'inscrire dans un questionnement, une recherche du « pourquoi » des choses (« *why* » chez Rosen, le « *to dioti* » d'Aristote). Rosen fait ainsi fond sur la distinction entre catégories de causes tant dans l'analyse des systèmes naturels que dans celle des systèmes formels.

C'est donc un même vocabulaire causal, celui des déterminations (*entailments*) qui

rendra compte des contraintes imposées au sein des systèmes réels ainsi que de celui de leurs représentations logico-formelles (les modèles). Le système formel sera caractérisé par ses structures d'inférences alors que le système naturel le sera par sa structure causale. L'art de la modélisation consistera d'ailleurs à ce qu'un modèle nous apprenne quelque chose sur les dispositifs causaux propres aux systèmes naturels modélisés. Rechercher les structures d'inférences des systèmes naturels est un des objectifs assigné à la science par Rosen (Voir supra).

Dans le système formel, traduction des déterminations causales en systèmes d'inférences logiques, la congruence causale avec le système naturel emprunte le schéma logique suivant. Pour dire que P (un théorème) implique ou détermine une proposition Q on doit mettre en œuvre une série de règles de production qui, partant de la proposition P aboutissent à Q. La question du « pourquoi P » implique alors la réponse : P est d'abord là en vertu des axiomes du formalisme. Ce que Rosen présente comme image de la cause « matérielle » de P, puisque ce sont les axiomes de la théorie qui permettent de produire P. Les règles de production de P (théorème) seront identifiés à la cause efficiente et la cause formelle spécifiée comme étant la séquence particulière de l'algorithme aboutissant à P. C'est ce schéma d'analyse, qualifié d'aristotélien, qui sera appliqué systématiquement à tout type de structure, formelle ou naturelle. Rosen réintroduit également la cause finale, après avoir noté qu'elle a fait l'objet d'un rejet radical au motif d'incompatibilité avec l'objet même de la science. Formellement, réintroduire la cause finale signifierait par exemple que pour que quelque chose soit la cause finale de P, il serait nécessaire que d'abord P détermine quelque chose qui déterminera P en retour. Cela pose bien évidemment problème. Autant les trois premières catégories causales s'intègrent dans des séquences, des images formelles au sein d'une même flèche temporelle car comme l'écoulement du temps, les séquences « causales » sont irréversibles. Par exemple les axiomes se situent toujours avant les conséquences qu'on en tire, etc. La cause finale contredit ce flux, car c'est l'effet que produirait P qui agit rétroactivement sur le processus d'inférences (causale) qui produit P. Le « futur » affecterait le « passé ». Rosen pointe cependant une confusion dans ce raisonnement critique. Ce qui est en jeu dans le processus causal ce n'est pas P directement, mais uniquement l'effet que produit P. La cause finale dans cet ordre d'idée ne participe plus du même ordonnancement temporel que les autres causes, et s'analysera sur un autre plan que ces dernières.

Au final, la cause finale implique des modes de détermination qui ne sont pas

présents dans les formalismes simples. C'est pourquoi Rosen développera un formalisme suffisamment riche en déterminations pour justifier de l'existence d'une catégorie causale apte à saisir des déterminations finalisées.

Les causes matérielles seront les intrants et extrants du « composant » ; les causes efficientes, ce par quoi ces intrants sont transformés en extrants ; la cause finale étant dès lors dans un système de déterminations complexes, appréhendée comme la mise en perspective d'une contrainte structurelle. Elle ne participe pas de l'analyse dynamique sous-jacente aux causes matérielles, formelles, efficientes (qui s'inscrivent dans un avant et un après) et n'est en conséquence plus en contradiction avec les principes de la physique classique (dans laquelle le futur ne peut être cause de ce qui est...)

- ***Ontologie du vivant, essence de la vie, définitions.***

Le principe de clôture sur causalité efficiente, est au fondement du modèle formel de l'organisme (vivant), il met l'accent sur une contrainte relationnelle. La clôture, définie dans un plan causal particulier, celui de l'ensemble des causes efficientes par lesquelles les composantes de l'organisme traitent les flux matériels, « ce qui fait que » l'organisme peut transformer ces éléments matériels en cohérence avec les lois physico chimiques de la matière. On énonce ainsi un principe propre, spécifique, intrinsèque aux organismes et définissant dès lors une nouvelle classe de structures matérielles. Il est au fondement de la singularité du vivant.

Ce principe, spécifiant une contrainte sur la cause efficiente, théorise ainsi la contrainte d'internalisation de la transformation d'un ensemble d'éléments matériels (des molécules organiques) en un autre ensemble (par exemple des macromolécules organiques) sans en spécifier directement le contenu et la forme. Pour que ce principe ne contredise pas le parti pris matérialiste adopté, il convient d'imaginer qu'une partie du résultat de cette transformation joue un rôle fonctionnel dans cette transformation. On songe bien évidemment, en se référant aux vivants, aux macromolécules produites par l'activité métabolique permettant d'élaborer les enzymes nécessaires et indispensables à l'exécution des activités cellulaires de toute nature. Plus généralement encore ce principe concerne tout ce qui rend possible et effective la transformation de la matière issue de l'environnement du vivant (le système naturel) en un ensemble de matériaux supports et conditions de son activité.

Ce qui est donc mis en lumière, c'est la contrainte ultime, essentielle qui permet de qualifier le système naturel (matériel) d'organisme. L'accent est mis sur la clôture de l'activité sur elle-même. Elle constitue le moteur de la transformation de la matière d'abord au bénéfice du système mais également et surtout pour le maintien dans la durée de cette capacité de transformation. L'analyse des principes d'actions, c'est-à-dire de l'ensemble de forces et contraintes qui agissent sur et au sein du système, en causes efficaces closes sur elle-même, dont le principe même de détermination réside au sein du système, et causes matérielles ouvertes sur l'extérieur, sur l'environnement, permet également de répondre à la question : qu'est-ce qu'un organisme ? La différenciation des principes d'actions, entre ceux qui participent de séquences temporelles et ceux qui rendent compte des effets de structure a également pour conséquence de légitimer la réintégration de la cause finale, de la fonction en tant qu'élément dispositionnel (et non plus comme fruit d'une histoire, comme trait sélectionné).

Caractériser l'organisme par sa contrainte relationnelle, essentielle, intrinsèque et propre à ce type de système ne permet-t-il pas alors de disposer d'une ontologie du vivant qui ne serait plus substantielle, liée à un éventuel substrat propre, mais qui serait le trait caractérisant une disposition singulière d'une matière demeurant fondamentalement similaire à celle qui constitue le mobilier du monde ?

La vie n'est plus alors la seule résultante du jeu complexe de lois physico-chimiques mais également celle de l'internalisation d'une propriété, d'une contrainte au sein d'un système matériel. Et cette internalisation par sa permanence est au fondement de l'autonomisation de l'organisme par rapport à son environnement.

Cette contrainte constitue donc la condition nécessaire pour qu'un ensemble matériel soit vivant. Mais elle ne serait pas suffisante au regard du constat que la démarche part d'emblée d'un présupposé. La définition n'est finalement pas directement celle de la vie, mais celle de l'organisme, comme objet doté d'une identité minimale. C'est finalement un système matériel qui se donne à l'observateur à travers ses multiples réalisations et dont on a caractérisé la singularité.

Ce qui conduit alors à une autre question. Qu'est ce qui conduit à cette individuation et à quel niveau d'organisation matérielle faut-il la situer ? Ce concept, certes problématique, appliqué au vivant (à quel niveau se situe le principe d'individuation, cellule, organisme, colonies etc..) capte néanmoins un autre aspect fondamental du vivant,

sa capacité à se différencier de son environnement tout en étant en interrelation étroite avec lui. Une partie de la réponse semble avoir été apportée par Rosen à travers la clôture sur causalité efficiente.

Mais ne retrouve-t-on pas à travers l'idéalisation des systèmes vivants réels, de la prééminence de la forme sur la matière, un retour aux formes intelligibles, intemporelles s'incarnant dans la réalité sensible qui est celle saisie par l'observateur ? Celui-ci pourrait dès lors être confronté à la matérialisation d'un système abstrait dans des réalités matérielles différentes, celle d'une matière organique pour les vivants actuels, peut-être minérale pour ce qui tend à devenir une vie artificielle.

Il semble cependant que c'est bien la recherche d'une réalité matérielle, dans une structure relationnelle, éventuellement commune à des structures matérielles différentes, l'une réalisée à partir de la chimie du carbone, de composés azotés etc. l'autre s'inscrivant dans des structures en silicium etc. qui est ce qui a motivé Rosen.³⁵⁴ La mise en évidence d'un principe d'organisation, ici le principe de clôture sur « causalité efficiente », qui ne procède pas directement des lois physico-chimiques régissant les composants élémentaires des systèmes, atomes, molécules, poly condensats..., mais qui sous certaines conditions procède de leurs interrelations, ouvre des perspectives intéressantes sur le plan heuristique et épistémique. D'une part, on se donne sur des bases formelles et théoriques des critères permettant de distinguer différentes configurations matérielles, ils sont au fondement des différences entre machines et organismes ; mais d'autre part on légitime également le recours à un concept d'émergence (diachronique) : la propriété du tout, l'organisme, est différente des propriétés des seules composantes élémentaires. Ce que dans ce cas l'émergence désignerait, ce ne serait plus une impasse explicative, mais la propriété intrinsèque d'un tout, d'un système, propriété qui pourrait éventuellement être partagée par d'autres systèmes matériels.

La vie est donc définie à travers celle de l'organisme, en opposition aux systèmes

³⁵⁴ La recherche et la formalisation de propriétés intrinsèques à une organisation donnée de la matière, participe de ces nouveaux champs de recherche transdisciplinaires théorisés par le *Santa Fe Institute*.

mécaniques, aux machines. On dispose alors d'un critère théorique discriminant entre classes de systèmes et d'une définition théorique d'un objet au fondement d'une science, comme préalable aux démarches d'investigations empiriques. Cette définition qui vise l'essence de la chose, rompt ainsi avec les propositions répétées élaborées autour de listes de propriétés communes à tous les objets vivants connus. Elle propose une définition stipulative et en compréhension. Ce qui est remarquable, c'est que celle-ci passe par-dessus la distinction qui semblait gravée dans le marbre entre soma et germen, pour saisir la propriété fondamentale du corps vivant comme organisme.

En conclusion, la définition de la vie est liée à celle de l'organisme selon la logique suivante : la vie est ce qui est instancié par un certain système matériel. Ce système matériel doit posséder un modèle clos sur la causalité efficiente.³⁵⁵ Tout système matériel qui possède un tel modèle est un organisme. Un système matériel donné est donc vivant s'il réalise ce modèle.

- ***Penser l'émergence du vivant***

En définissant précisément ce qui sépare système mécanique et organisme, Rosen fournit un critère de discrimination précis sur un plan théorique. Cette opposition, qui désigne la qualité nouvelle d'une organisation matérielle pose du coup une question : comment en rendre compte dans le cadre d'une trame historique marquée par l'émergence du vivant à partir d'un état pré biotique et donc penser son avènement (c'est-à-dire l'expliquer à partir d'hypothèses testables et compatibles avec une physico chimie possible de la Terre) ? Si de nombreuses théories, que l'on pourrait qualifier d'auto organisation (ou plutôt d'hétéro organisation), permettent de penser l'avènement de structures organisées qualifiées de vivantes, elles devraient alors pouvoir rendre compte d'un changement qualitatif, l'émergence de l'organisme au sens de Rosen, signant le passage d'une structure matérielle à une autre, différente sur le plan organisationnel. Il semble que sous ce point de vue la théorie de l'organisme exposée précédemment constitue « un point

³⁵⁵ Le modèle relationnel de l'organisme est le graphe des relations entre fonctions « métabolique (M) », « réparation(R) », « répliation (partie de R) » obéissant au principe de clôture sur « cause efficiente ».

aveugle » dans le sens où elle n'ouvre pas de perspectives explicatives du passage de modèles de type « mécanique » à un modèles de type « organique ».

Par ailleurs Rosen, sans nier la théorie de l'évolution, relativise fortement son apport à la compréhension de la vie.³⁵⁶ L'auteur de « *Life Itself* » remarque que le darwinisme permet de rendre compte du processus d'apparition des fonctions dans les organismes (approche étiologique) mais ne permet pas de rendre compte de leur place et de leur rôle en tant que tel (aspect dispositionnel). Pour Rosen l'évolution n'est pas constitutive de la vie. A l'inverse, les vivants sont des objets matériels instanciant les processus évolutionnaires et l'évolution n'est alors qu'un corollaire de la vie, d'une forme particulière de vie. Rosen dénonce d'ailleurs la « *weltanschauung* » qui fait de l'évolution le pilier central sur lequel repose la biologie contemporaine et qui conduit à évacuer toute recherche de détermination causale dans le processus évolutionnaire, au profit d'une simple collection de chroniques ou d'histoires mettant en forme les trajectoires passées des vivants contemporains.

Tel que, le modèle peut donc conduire à un « point aveugle » constitué autour d'un avant justiciable des seules lois physico-chimiques, du mécanisme, et d'un après, royaume de l'organisme. En partant du vivant actuel, dans une opération de rétroduction, il faudrait par exemple concevoir l'émergence du vivant en tant qu'organisme vivant doté des propriétés décrites sous forme de « listes » ouvertes, comme étant la résultante d'un processus d'internalisation de processus catalytique à imaginer et permettant d'aboutir à des systèmes matériels analysables sous l'angle de la « clôture sur cause efficiente ».

³⁵⁶ Voir cette affirmation dans « *Life Itself* » en page 255 : « *it is easy to conceive of life, and hence biology, without evolution* ».

3.2 L'automate fluide (le *Chemoton*) de Tibor Gánti

Après la présentation de l'approche développée par Rosen nous poursuivons l'exploration des rapports entre compréhension de la vie et modèles du vivant avec les travaux du chimiste et biologiste d'origine hongroise, Tibor Gánti.

Dans ce modèle on descend d'un degré d'abstraction en mettant en scène une matière saisie à travers une chimie encore abstraite préfigurant néanmoins celle rencontrée dans le vivant réel. On quitte donc un modèle spécifiant les contraintes essentielles qui caractérisent l'organisme indépendamment de sa matérialisation, pour saisir à travers la représentation stylisée de la matière familière au chimiste et au biochimiste ce qui doit faire système pour être vivant. Celui-ci sera largement fondé sur les données d'une matière adhérente à la physico chimie telle qu'elle s'expose et se pratique. Le «*chemoton*» sera ainsi un modèle incarné, tant la matière, même sous sa forme idéalisée, est présente. Sa caractéristique essentielle reposera sur un ensemble de réactions chimiques nécessairement associées au sein d'unités auto catalytiques couplées formant système. Modèle global, car il s'agit à travers le concept du *chemoton* et sa traduction formalisée, de livrer une représentation théorique des caractéristiques essentielles de l'être vivant le plus simple, capable d'homéostasie et d'évolution.

L'idéalisation du vivant élémentaire s'élabore autour de trois systèmes auto catalytiques : un sous-système métabolique, une membrane « fluide » à deux dimensions et enfin un sous-système de régulation. Ces trois sous-systèmes porteurs des fonctions élémentaires de l'unité vivante sont interconnectés afin de constituer un ensemble intégré dans lequel toutes les parties fonctionnent de concert.

Dans l'introduction de l'ouvrage « *The principle of life* »³⁵⁷ Gánti affirme que son objectif est de dévoiler le secret de la nature de la vie et d'identifier ce qui différencie fondamentalement systèmes vivants et non-vivants. La théorie du *Chemoton* visera à livrer les bases théoriques de cette différence et à fournir un support aux hypothèses orientant

³⁵⁷ Gánti Tibor. *The principles of Life*. Oxford University Press, 2006

les explications de la formation spontanée de la vie.³⁵⁸

Le modèle, ses présupposés théoriques, introduisent à une série de questionnements : qu'est ce qui rend une chose vivante ? En quoi diffère-t-elle des choses non-vivantes ? Où se situe la frontière entre vivant et non vivant ? Quel est le secret des caractéristiques propres au vivant, universellement présentes dans tout organisme vivant et qui sont absentes dans tout système non-vivant?³⁵⁹

La théorie du *chemoton* résulte d'une élaboration progressive dont la maturation a été concomitante aux avancées rapides de la biologie moléculaire, depuis la détermination en 1953 de la structure de l'ADN par Watson, Crick et Rosalind Franklin. Gánti a d'ailleurs été l'un des introducteurs de la biologie moléculaire dans la Hongrie socialiste des années cinquante. C'est donc dans le contexte moléculaire que la théorie du *Chemoton* s'est développée, exploitant notamment les fondements de la structure de l'ADN, du rôle spécifique de séquences d'acides aminés : la stéréochimie des protéines et de leurs structures primaires, secondaires, tertiaires. Mais c'est également l'élucidation en parallèle de processus auto catalytiques comme ceux mis en œuvre dans le cycle de Krebs (ou cycle de l'acide citrique) qui a inspiré l'auteur du *chemoton*. Enfin ce seront également la mise en évidence des phénomènes de régulations moléculaires interprétables dans le cadre de la cybernétique, qui nourriront son contexte de théorisation.

L'élaboration théorique du modèle d'automate fluide s'est déroulée de novembre 1952 : élaboration du cœur théorique du *Chemoton*, à l'année 1971 date de la publication en hongrois des « principes de vie ». L'édition anglaise « *the principle of life* » qui sort en 2003 apportera des compléments et des révisions à l'édition hongroise. C'est l'édition 2006³⁶⁰ qui constituera la matière d'exposition de l'approche développée par Gánti.

³⁵⁸ Selon le Littré, genèse signifie étymologiquement, production, engendrement. Il serait intéressant de situer l'émergence par rapport à la genèse comme signifiant une classe d'engendrement.

³⁵⁹ On retrouve ici une déclinaison de ce que nous avons appelé l'originalité du vivant : originalité fonctionnelle, originalité compositionnelle, originalité phénoménologique.

³⁶⁰ Déjà cité.

3.2.1 Le système vivant minimal : le *chemoton*.

Les premiers éléments de la théorie du *Chemoton* ont donc été exposés en 1971. Ce terme désigne une machine chimique présentant les caractéristiques de la vie. Les premiers travaux ont été enrichis et complétés pour y intégrer l'hypothèse d'un système vivant minimal permettant d'explorer la frontière entre l'inanimé et le vivant. Ils ont été complétés par des simulations informatiques et le développement de méthodes mathématico-chimiques. Ces travaux de première approche ont mis en évidence la nécessité d'incorporer dans la machine chimique un sous-système liant tous les autres et assurant la séparation spatiale avec l'environnement. La nécessité de cette introduction découlait plus de considérations mathématiques que physiques. Néanmoins le rôle joué par ce sous-système, comme membrane fluide à deux dimensions s'inspirera étroitement des travaux de Singer et Nicholson.³⁶¹

Le concept fondamental qui sous-tend le *chemoton* est celui de l'automate fluide. Par-là, Gánti inscrit le système complexe de réactions chimiques des organismes vivants dans celui du fonctionnement des machines régulées et contrôlées se différenciant néanmoins des automates mécaniques par l'absence de parties solides, toutes les opérations se déroulant au sein d'un milieu fluide via des mécanismes chimiques. On pointe là une des différences essentielles entre automate mécanique, ou électronique et le *chemoton*. Son fonctionnement n'est plus contraint par la géométrie et l'organisation de parties fixées dès l'origine de la construction, mais par sa constitution en système sous l'effet de l'enchaînement de cycles réactionnels.

³⁶¹ Singer S.J., Garth L. Nicholson. The Fluid Mosaic Model of the Structure of Cell Membranes. *Science*, 1972, 18: Vol. 175 no. 4023 pp. 720-731

- ***Présentation qualitative.***

Gánti souhaitait élaborer un modèle de vivant comme unité de base abstraite exprimant les caractéristiques essentielles de vie. Ces unités de vie, systèmes exhibant la propriété biologique de vie, disposent d'une structure fondamentale que l'on retrouve aux différents niveaux d'organisation formant la famille vivante telle que nous la connaissons. Par exemple, les procaryotes, systèmes vivants déjà très complexes, possédant des systèmes enzymatiques de régulation sophistiqués, mettent en œuvre les mêmes principes de base que ces unités de vie. Cependant, ces principes de base ne résident pas dans le système enzymatique qui ne fait qu'accroître l'efficacité des fonctions cellulaires, mais dans ceux organisant le système dans son ensemble. Ce sont ces principes qui sont au fondement du *chemoton*.

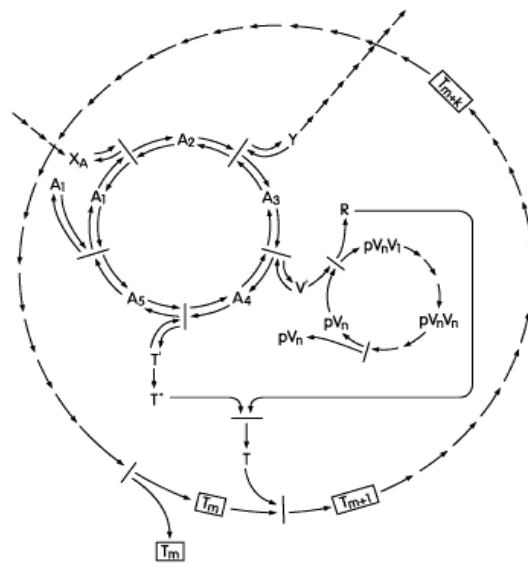
Selon Gánti, les systèmes vivants sont fondamentalement souples et fluides. Les processus de base sont réalisés via le jeu de réactions chimiques non spatialisées. Par rapport au vivant réel, le modèle opère une réduction conduisant à penser les phénoménologies vivantes comme propriété de systèmes unitaires. Cela conduit dès lors à spécifier formellement un système minimal abstrait présentant les caractéristiques les plus fondamentales de la vie. Il s'agit notamment de la capacité à exhiber une stabilité intrinsèque, malgré les dynamiques d'échanges et la multitude de changements chimiques. Sur le plan chimique cela n'est possible qu'en présence d'états stationnaires (ou quasi stationnaires) de non-équilibre, ces systèmes accomplissant en permanence un travail au sens thermodynamique, au prix de transformations chimiques continues. L'un des réquisits rendant possible cette continuité, est l'exigence que les changements opérant dans le système se réalisent selon des voies contraintes.

Le système minimal, modèle du vivant, est alors constitué de l'association de trois automates fluides, de trois sous-systèmes supports les fonctions de base indispensables à l'expression d'une forme de vie minimale. Le premier de ces automates est un sous-système métabolique. Il est formé d'un réseau réactionnel de composés chimiques à faible poids moléculaire. Ce sous-système auto catalytique élabore les composants nécessaires à sa reproduction ainsi qu'à l'alimentation des deux autres sous-systèmes. Le deuxième consiste en une membrane fluide à deux dimensions qui croît en incorporant des composants produits par le premier. Enfin le troisième, le système réactionnel de régulation, produit des macromolécules par polycondensation dirigée à partir des

composés élémentaires synthétisés par le premier sous-système. Par ailleurs, les sous-produits de la réaction de polycondensation sont également partie prenante à la réaction de formation de la membrane fluide. Ce troisième et dernier sous-système contrôle les deux autres par le biais d'un couplage stœchiométrique³⁶² définissant précisément les proportions de composants qui participent aux échanges. Grâce à ce couplage, les trois sous-systèmes constituent un super système : le *chemoton*.

Ce super système décrit sommairement, est formalisé par les équations des réactions intervenant dans chaque cycle ainsi que par leurs équations de couplages. La simulation du fonctionnement dynamique d'un tel système à partir de données théoriques de cinétiques réactionnelles³⁶³ fait apparaître des comportements phénoménologiques intéressants et propres aux structures vivantes. Nous reviendrons sur cet aspect plus loin.

- ***Schéma représentant le modèle du chemoton, idéalisation d'un système vivant minimal.***



Le modèle du *chemoton*

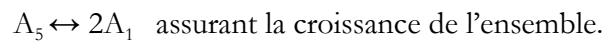
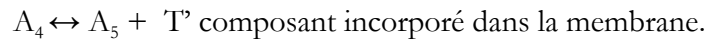
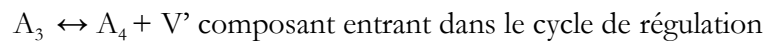
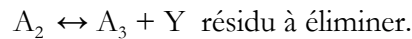
³⁶² Stoechiométrique : qui a trait aux proportions en jeu dans une relation chimique.

³⁶³ Voir par exemple Csentesi T., A simulation study on the chemoton. *Kybernetes*, 1984, vol.13. Thales Publication, Great Britain. Plus récemment: Munteanu Antenea, Ricard V. Solea Ricard V., Phenotypic diversity and chaos in a minimal cell model. *Journal of Theoretical Biology*, 2006, 240, 434–442

Ce schéma présente sous forme simplifiée, le modèle de l'unité de vie minimale. Les trois sous-systèmes introduits précédemment fonctionnent sous un régime de cycle auto catalytique.

a) Sous-système métabolique :

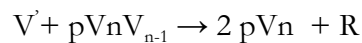
A partir des nutriments X_A nous avons la séquence de réactions suivantes :



Ce cycle réactionnel alimente les deux autres cycles selon des modalités spécifiques.

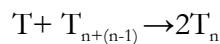
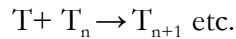
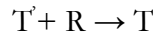
b) Sous-système de régulation.

Il est constitué d'une série de réactions de polycondensation dirigée sur matrice, d'addition de monomères V à une chaîne pV_n pour former un double brin. A partir d'une certaine longueur de ce double brin, celui-ci se défait pour redonner deux chaînes pV_n .

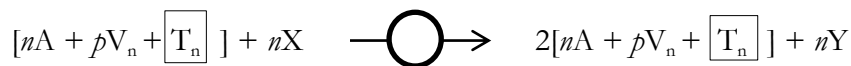


c) La clôture de l'ensemble est assurée grâce au sous-système membranaire. Elle résulte d'une part de la clôture spatiale du système qui crée ainsi une séparation physique entre un intérieur et un extérieur, et d'autre part de l'emploi comme

intranant propre, des produits de réactions T' et R, assurant ainsi la clôture des cycles réactionnels précédents. Cette séparation physique n'est cependant que relative car elle doit permettre des échanges minimaux avec l'environnement : apport des matériaux d'alimentation X et élimination des résidus de réaction Y.³⁶⁴



Le super système résulte en conséquence de la relation forcée entre les trois sous-systèmes précédents. Sa représentation formelle via l'équation stœchiométrique générale définit alors les relations molaires entre les différents composés :



La régulation de l'ensemble est réalisée via le degré de polymérisation de la réaction de polycondensation sur matrice. Dans la version primitive du *chemoton*, cette régulation opère via la longueur du double brin du polycondensat $2pV_n$. Au bout d'un certain degré d'avancement de la réaction, le brin en formation se détache du brin « matrice » et induit la scission de la sphérule formée par le système membranaire en raison de l'augmentation de la pression osmotique interne. Deux nouveaux automates sont ainsi formés.³⁶⁵ Le mécanisme développé par Gánti recourt aux principes de la

³⁶⁴ La constitution de la membrane fluide à deux dimensions repose sur le même principe que celui constituant les membranes cellulaires : une double couche de molécules comportant d'un côté des groupes hydrophobes et de l'autre des groupes hydrophiles dans un environnement aqueux.

³⁶⁵ Le couplage avec les différents réseaux auto catalytiques, notamment dans la synthèse des molécules nécessaires à la formation de la membrane, permet de faire croître celle-ci à hauteur de la production de composants par le sous-système métabolique. Cette croissance provoque l'augmentation de la surface membranaire ainsi que celui de son volume. Le volume s'accroissant en proportion plus rapidement que la surface, fait décroître la concentration en composants ce qui, modifiant la pression osmotique, tend à faire partir l'eau à l'extérieur de la membrane, et en raison de contraintes mécaniques sur la surface sphérique, conduit à la division en deux sphères. Ce processus a été modélisé par : Tarumi et Schwegler. A non linear treatment of the protocel model by a boundary layer approximation. *Bulletin of Mathematical Biology*. 1984, 47 : 307-20. Il permet de simuler la formation de protocellules.

polymérisation dirigée sur matrice à partir de séquences monomériques formées d'acides nucléiques. Celles-ci ont tendance à s'apparier en double brin qui, sous l'effet de l'augmentation de la concentration en monomère peut se déliter. Finalement c'est le cycle autocatalytique du sous-système métabolique qui produit un monomère ne pouvant polymériser que lorsque, sous l'effet de l'augmentation de sa concentration, le double brin déjà formé se délite.³⁶⁶ On dispose ainsi d'un système autocontrôlé dont les paramètres relèvent de la stœchiométrie de couplage entre cycle de production du monomère et le système de régulation réalisé avec les chaînes d'acides nucléiques poly condensés. Dans des versions plus élaborées l'information de régulation ne résulte plus seulement de la longueur du polymère de polycondensation, mais grâce à l'incorporation de monomères de natures différentes, de la formation de séquences signifiantes du polymère de polycondensation (modélisé par $2pV_{n-k}W_k$) portant alors l'information de régulation.

Les trois sous-systèmes croissent en totale harmonie. Ils croissent et se reproduisent au même rythme car après avoir atteint un stade critique déterminé physiquement, le super-système se divise pour donner naissance à deux *chemotons* identiques (du moins dans sa version primitive) et donc à la multiplication du système.

- ***Fonctionnement du chemoton. (Résumé)***

Chaque sous unité de ce *chemoton* fonctionne de la manière suivante :

- a) L'unité métabolique, la machine chimique auto reproductible « fluide », produit à partir de molécules élémentaires des molécules plus grosses et plus complexes possédant un contenu énergétique élevé. Les molécules ainsi synthétisées incluent celles nécessaires à la formation de la machine elle-même (d'où auto catalyse et auto reproduction), mais également celles aptes à une polymérisation dirigée (sur matrice) et celles qui après transformation assurent la croissance membranaire.

³⁶⁶ Szathmary note que la recherche de « gabarits » de répliation possédant de longues séquences relève de la recherche du « saint graal ». Des gabarits courts peuvent se répliquer aisément, mais pour des brins un peu long, la « dépairisation » spontanée reste difficile et il faut l'intervention d'un troisième facteur : contact avec une surface, action d'enzyme répliqueuse...

- b) La deuxième sous unité est l'unité de contrôle. Elle contient un grand nombre de polymères constitués d'une structure à double brin qui à partir d'une concentration donnée de monomère se délite formant des brins individuels, chacun pouvant à nouveau servir de matrice de polymérisation dirigée. L'un des sous-produits de cette réaction de synthèse réagira par la suite avec un produit du cycle auto-catalytique pour former la molécule composant la membrane. La consommation de monomères dans un cycle de polymérisation (et donc la quantité de produit de condensation formée) est déterminée précisément par le nombre et la longueur des molécules matrices.³⁶⁷
- c) La troisième sous unité consiste en une membrane semi-liquide à deux dimensions qui clôt le système. Cette membrane reste perméable aux molécules nutritives et à l'évacuation des déchets. Seuls les produits élaborés en interne demeurent au sein du système. Les molécules produites par le système sont incorporées spontanément au sein de la membrane faisant ainsi croître sa surface.

A partir d'un moment d'équilibre de la pression osmotique, les nutriments pénètrent à travers la membrane et réagissent avec les matériaux du réseau autocatalytique du sous-système métabolique. Les matériaux nécessaires au fonctionnement du réseau lui-même, les précurseurs des molécules entrant dans la formation des membranes et du sous-système de régulation sont ainsi synthétisés en continu. Quand la concentration en monomère atteint la valeur qui rend la structure en double brin instable, celle-ci se délite et une nouvelle polycondensation peut débuter. De nouveaux brins sont donc élaborés consommant l'essentiel du monomère. Les sous-produits de la réaction de polycondensation réagissent avec les précurseurs des molécules de formation de la membrane pour intégrer alors la structure membranaire. Cette incorporation fait croître le volume enclos par la membrane, diminue la pression osmotique en son sein et induit la division de la cellule formant ainsi un nouveau super système.

³⁶⁷ Mais même en dehors d'un mécanisme fondé sur le modèle d'un « patron » (de polymérisation) induisant des répliquations avec erreur, les sphérules peuvent, dans ce modèle, être vivantes. Voir sur ce point les structures de systèmes héréditaires de Jablonka E., Lamb M. ; *Epigénétique inheritance and evolution*. Oxford University Press : 1995. Il s'agit de systèmes à hérédité limitée au sens défini par Szathmary : commentaires sur « *The principles of Life* », p.107

On peut donc à partir de ce modèle simple concevoir des divisions successives de microsphères toutes identiques entre elles. On transforme ainsi une machine chimique d'un espace chimique abstrait en un système fonctionnant dans un espace géométrique.

Les simulations numériques réalisées avec un modèle conçu à partir de constantes cinétiques précises, un schéma de connexion donné etc. ont permis de réaliser un *chemoton* simulant un système vivant réel.³⁶⁸ La finalité du modèle réside ainsi dans son potentiel heuristique exprimant selon les propos de Gánti, un haut degré de sérendipité.³⁶⁹

3.2.2 Le système vivant minimal : concepts et contextes de théorisation

Cette démarche de modélisation des systèmes vivants, s'inscrit dans celle des sciences exactes. Gánti affirme ainsi que toute science exacte ne modélise qu'une partie du monde réel, comme un point de vue adopté sur une partie de la réalité, négligeant des phénomènes qui ne seront pas pris en compte par le modèle. Ce qui relève alors de cette science « exacte » ne concernera donc que la partie, ou le système, dans le champ du modèle. L'exactitude, la précision quantitative est assurée via la démarche d'abstraction nécessaire à la saisie, la représentation de la partie pertinente de réalité que l'on souhaite modéliser. Tout ce qui est hors modèle ou hors sujet est pris *ceteris paribus*. Avec le *chemoton* Gánti conçoit donc une unité élémentaire de vie comme concept fondamental de la biologie, une sorte de pendant au point matériel de la mécanique rationnelle (point abstrait sans extension mais porteur d'une masse, d'une position dans un espace...) Ce

³⁶⁸ Csendes T. déjà cité. Voir également : Van Segbroeck Sven, Nowe Ann, Lenaerts Tom, Stochastic Simulation of the Chemoton. *Artificial Life*, 2009, 15: 213–226. Fernando Chrisantha and Daniel Di Paolo Ezequiel. The Chemoton: A Model for the Origin of Long RNA Templates. *Ninth International Conference on the Simulation and Synthesis of Living Systems (ALIFE9)*, 2004. Fernando Chrisantha. *The Evolution of the Chemoton*, Thèse pour le grade de Docteur en Philosophie, 2005

³⁶⁹ Walpole (1754) : Le fait de découvrir quelque chose par accident et sagacité alors que l'on est à la recherche de quelque chose d'autre.

Merton (1945) : La découverte par chance ou sagacité de résultats pertinents que l'on ne cherchait pas. Elle se rapporte au fait assez courant d'observer une donnée inattendue, aberrante et capitale qui donne l'occasion de développer une nouvelle théorie ou d'étendre une théorie existante. Merton (1949) dans : *Social Theory et Social Structure* : le processus par lequel une découverte inattendue et aberrante éveille la curiosité d'un chercheur et le conduit à un raccourci imprévu qui mène à une nouvelle hypothèse.

Pek Van Andel & Danièle Bourcier (2001) : La capacité à découvrir, inventer, créer ou imaginer quelque chose de non trivial sans l'avoir délibérément cherché.

chemoton, unité fondamentale de la vie, a ainsi vocation à constituer l'unité physique, matérielle, dotée des propriétés vitales élémentaires.

Pour Gánti, la nature de la vie est à la fois une question philosophique et une question fondamentale pour la science. D'un point de vue épistémologique, la compréhension de la vie est l'une des conditions permettant de fonder la biologie théorique. Le *chemoton* en proposant un système vital minimal comme modèle de vie a vocation à devenir le support d'une science théorique de la biologie. Gánti est conforté dans cette démarche par les exemples puisés dans les sciences physiques : charges électroniques élémentaires des sciences de l'électricité, molécules en chimie, cellule élémentaire en cristallographie, gènes en génétique des populations etc. Dans cette perspective, le *chemoton* a vocation à rendre compte de la nature de l'unité de vie élémentaire, aboutissement d'évolutions ayant conduit des systèmes matériels à acquérir une qualité nouvelle.

La démarche d'élaboration formelle du système exprimant les propriétés attribuées communément à la vie, peut conduire à une démarche circulaire : définir la structure vivante (le vivant) à partir de propriétés « vitales » comme étant les propriétés exhibées par la structure vivante. Gánti évite cette circularité dans une démarche qui s'inscrit alors dans un équilibre réflexif entre définition du système vivant élémentaire et définition de la vie à travers l'établissement de critères de vie absolus et potentiels.

- ***Les critères de vie.***

Pour Gánti, il est indispensable de définir les critères de vie afin de pouvoir établir les lois qui unissent les propriétés des vivants. Il s'agit de caractériser « ce » qui fait la différence entre vivant et non vivant. Cette différence est qualitative et unifie les propriétés de regroupements matériellement organisés qui diffèrent de ce qui est rencontré dans le monde non vivant. Et ces regroupements sont organisés dans le sens particulier modélisé par le *chemoton*. Ce n'est donc pas la matière qui possède intrinsèquement la propriété vitale. Seule son organisation, selon le modèle décrit précédemment, lui permet d'exhiber les propriétés vitales. La différence entre vivant et non vivant résulte de la présence et du fonctionnement de concert des processus de base décrits dans le *chemoton*.

La démarche entreprise par l'auteur du *chemonton* s'inscrit dans une forme de

circularité qui partant de l'analyse du réel, celui des phénomènes vivants, des processus fondamentaux, conduit à une sorte de cahier des charges du modèle formel du vivant minimal idéalisé. En retour le modèle vérifiera ces propriétés modélisées et rendra possible l'exploration, grâce aux simulations, de questions nouvelles.

La confrontation du modèle avec les organismes vivants décrits par les sciences de la vie a conduit Gánti à différencier les critères de vie en critères de vie absolus ou réels et critères de vie potentiels.

- *Les critères absolus ou réels de vie.*

Un système vivant est un système intrinsèquement unitaire : seul le système pris dans son ensemble, dans sa globalité manifeste la totalité des propriétés vitales. Gánti insiste pour dire qu'un système formant une unité n'est pas la simple addition de ses éléments, mais une nouvelle entité véhiculant des propriétés qualitativement nouvelles, différentes de celles de ses parties. Gánti note par ailleurs que les systèmes vivants sont structurellement et fonctionnellement déterminés génétiquement. L'unité biologique du système est également déterminée génétiquement. Le programme génétique véhicule les informations qui concernent l'unité vivante en tant que telle.

- a) Un système vivant possède un métabolisme : matériaux et énergie sont incorporés et transformés dans le système afin de fournir les composants indispensables à son fonctionnement. Ce processus produit des déchets qui doivent être évacués. S'organise ainsi une « géographie » interne/externe assignant à la matière un statut différent selon qu'elle est ou non partie prenante aux processus du système unitaire. Sous ce rapport, ce qui est au fond de la différenciation est moins la séparation spatiale que la place des éléments matériels dans le processus primordial. Ainsi les nutriments stockés au sein du système sont analysés comme étant externes à l'unité intrinsèque.
- b) Un système vivant doit être intrinsèquement stable, son organisation doit être conceptualisée comme unité intrinsèque. Chez Gánti, cette exigence n'est pas synonyme d'état stationnaire ou d'équilibre. Certes le *chemoton*, dans son fonctionnement forme une structure dissipative, alimentée continûment par des nutriments, évacuant ses déchets de moindre valeur énergétique et se maintenant en permanence loin de l'équilibre thermodynamique. Cette structure, conceptualisée comme unité intrinsèque, forme un tout décomposable analytiquement en sous-

systèmes qui ne sont pas vivants par eux-mêmes. C'est leur recombinaison par le lien de la connexion nécessaire qui permet à l'ensemble d'exhiber des propriétés que les sous-systèmes seuls ne possédaient pas. Ce tout manifeste notamment une stabilité inhérente, propriété intrinsèque, dans le sens où à la fois son unité et son isolement spatial lui permettent de constituer un milieu intérieur relativement constant et ce malgré les variations de l'environnement. Ce critère d'individualisation et de stabilité unifie à la fois le concept d'homéostasie et celui d'excitabilité. Il est d'ailleurs intéressant de retrouver des accents proches de ceux de Claude Bernard lorsque Gánti traite du maintien de la constance interne, comme propriété des vivants, comme conséquence de l'organisation fonctionnelle modélisée par le *chemoton*.

L'homéostasie, état qui garantit le fonctionnement continu de l'automate fluide en dépit de changements dans l'environnement, résulte de l'organisation même du *chemoton*. C'est le système en tant que totalité qui demeure stable en dépit des changements perpétuels qui se déroulent en son sein. Cette stabilité, propriété inhérente au système vivant, est une conséquence naturelle de la présence d'un milieu intérieur.³⁷⁰ Ce principe, propre aux systèmes en croissance et se multipliant, autorisera l'évolution vers des systèmes de régulation de plus en plus sophistiqués. L'homéostasie n'est donc pas synonyme d'équilibre ou d'état stationnaire,

³⁷⁰ On retrouve le concept de milieu intérieur développé par Claude Bernard, mais également la reprise du principe d'homéostasie développé par le physiologiste Walter Cannon. Ainsi Claude Bernard en 1865, dans son *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale* : « Tous les mécanismes vitaux, quelque variés qu'ils soient, n'ont toujours qu'un but, celui de maintenir l'unité des conditions de la vie dans le milieu intérieur. » Le mot « homéostasie » a été forgé par W. B. Cannon à partir de deux mots grecs : *stasis* (« état, position ») et *homoios* (« égal, semblable à ») ; il définit la stabilisation des états qui permettent les processus biologiques de la vie telle qu'elle ressort de cette phrase extraite de *The Wisdom of the Body* : « Les êtres vivants supérieurs constituent un système ouvert présentant de nombreuses relations avec l'environnement. Les modifications de l'environnement déclenchent des réactions dans le système ou l'affectent directement, aboutissant à des perturbations internes du système. De telles perturbations sont normalement maintenues dans des limites étroites parce que des ajustements automatiques, à l'intérieur du système, entrent en action et que de cette façon sont évitées des oscillations amples, les conditions internes étant maintenues à peu près constantes [...]. Les réactions physiologiques coordonnées qui maintiennent la plupart des équilibres dynamiques du corps sont si complexes et si particulières aux organismes vivants qu'il a été suggéré qu'une désignation particulière soit employée pour ces réactions : celle d'homéostasie. » (Encyclopédie Universalis). On rappellera également que Waddington avait forgé le concept d'homéorhesis dans « *The basic ideas of biology* »(1968) pour parler de stabilité de trajectoire plutôt que de stabilité d'état. Cité par Griesemer : commentaires sur «the unitary theory of life »(*the principles of life* p. 77)

d'homéostat cybernétique à la Ashby (l'équilibre de ce type d'automate est prédéfini) ou de stabilité à la Lyapounov (évolution d'un système dynamique vers un point stable). La constance du milieu intérieur, l'homéostasie n'est assurée que grâce à la capacité du système à détecter les changements dans l'environnement et à sa capacité à réagir par une compensation active. Le mécanisme de réalisation par le *chemoton* de ce principe dynamique d'homéostasie est appelé excitabilité par Gánti.

- c) Un système vivant doit posséder un sous-système porteur d'informations utiles au système global. Il s'agit par exemple du système génétique, du système nerveux, du système immunitaire, etc. Ces propriétés sont liées à un certain type d'organisation et non à un certain type de matière. Gánti avance l'idée d'un « surplus d'information » concernant les objets matériels car ces choses véhiculent en plus de l'information qui les caractérise en propre, celle concernant un système dans son ensemble, voire de son environnement : livres, disques magnétiques, cartes perforées etc. Les données stockées dans de tels systèmes n'acquièrent le statut d'information qu'en présence d'un autre système capable de les utiliser.³⁷¹
- d) Les processus d'un système vivant doivent être régulés et contrôlés. Tout système dynamique dispose d'un système de régulation, condition nécessaire à un fonctionnement pérenne. Il en est ainsi des systèmes vivants, systèmes dynamiques souples dans lesquels la régulation procède de mécanismes chimiques. C'est ce système qui permet de gérer des processus non réversibles, unidirectionnels. Gánti attribue cette capacité à la présence d'un programme.

▪ *Les critères de vie potentiels.*

Ce sont des critères qui ne participent pas d'une définition stricte du système individuel vivant. Ils sont néanmoins indispensables afin d'assurer la survie du monde vivant. Ainsi que le note Griesemer cette distinction s'inscrit dans la tradition autopoïétique différenciant critères primaires et réels de l'organisation vivante de ceux rendant possible un monde vivant.

³⁷¹ Nota : Griesemer rappelle que ce surplus d'information constitue le contenu sémantique. Il s'agit de ce à quoi réfèrent les symboles eux-mêmes : voir « *the principle of life* » p 107

- a) Un système vivant doit pouvoir croître et se multiplier. Ce critère ne caractérise pas l'état de vie au sens strict, certains organismes vivants étant dans l'impossibilité de se reproduire (à l'exemple des mulets). Gánti justifie l'association étroite entre croissance et multiplication par le fait qu'il vise à fournir en premier lieu les critères de vie des organismes les plus simples, la reproduction des organismes multicellulaires n'étant qu'indirectement reliée à leur croissance.
- b) Un système vivant doit avoir une capacité de changement héréditaire et pouvoir évoluer. L'hérédité est conçue ici, comme la capacité d'un système à produire des individus identiques ou similaires, ou encore à produire des cellules germinales qui assurent la formation de tels individus. La capacité à évoluer sera alors la propriété qui permet de produire sur une période longue de plusieurs générations de manière croissante des formes complexes et différenciées. Gánti met ainsi en exergue la capacité de changements héréditaires comme condition d'évolution sans la réduire à un réquisit caractérisant l'état de vie de l'unité individuelle. Cette capacité introduit un jeu entre individus et population. La capacité d'évolution réfère à une population et non à un individu et celle de l'hérédité à l'unité matérielle individuelle comme porteuse des différences. Ce critère de vie potentiel introduit les distinctions entre unités de vie et unités d'évolutions.³⁷²
- c) Un système vivant doit être mortel : vie et mort forment une paire conceptuelle complémentaire. Gánti insiste sur la nécessité de la mort qui assure le recyclage des matériaux organiques. Ce n'est bien évidemment pas un critère de l'état de vie, il en constitue d'ailleurs sa négation. Par ailleurs, ce critère mérite d'être nuancé. Pour des formes élémentaires telles les procaryotes, la disparition d'un individu n'est pas liée à sa mort mais à la formations d'individus « sœurs » par division cellulaire. On conçoit dès lors que ce critère ne réfère pas au monde vivant dans sa globalité.

³⁷² Selon Maynard Smith les unités d'évolution sont des unités qui peuvent se multiplier et mettent en jeu des variations héréditaires. Maynard Smith J., *The problems of biology*. Oxford University Press, 1986. Les deux ensembles unités de vie et unités d'évolutions ne sont donc pas superposables. Voir également: Lewontin R.C., The Units of Selection. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1970, Vol. 1: pp. 1-18.

Les critères de vie potentiels ne constituent donc pas le *requisit* de la vie individuelle. Un système est vivant s'il satisfait aux seuls critères absolus de vie quel que soit les matériaux de construction ou quelle que soit la qualité des substances chimiques nécessaires à sa mise en œuvre. On peut ainsi traiter des lois de la vie sur un plan général indépendamment de leur réalisation ou leur instanciation matérielle. Dans ce modèle, l'idée de vie, sa définition est également déconnectée des matériaux constitutifs du vivant actuel : protéines, acides nucléiques etc.³⁷³

- ***Théorie des systèmes***

La conception de l'automate fluide ou *chemoton* s'inscrit dans plusieurs filiations. L'une de prime abord surprenante pour un chimiste, procède de la métaphysique leibnizienne : le vivant comme automate divin. Chez Leibniz les êtres vivants sont des automates, des automates divins,³⁷⁴ c'est-à-dire des objets similaires aux automates mécaniques faits de rouages et de poulies mais qui en diffèrent, car contrairement aux artefacts humains, ils demeurent machines jusqu'à leur moindre détail. L'automate fluide est en somme la concrétisation sur un plan théorique de ces machines divines ou naturelles. Il opère selon un but déterminé par son contrôle interne qui repose sur la dualité entre une partie agissante et une partie qui contrôle. Chez Leibniz, cette opposition se résolvait avec le concept d'entéléchie comme principe d'agir. Gánti s'en inspire en concevant la dualité sous forme de deux (sous) systèmes unis au sein du système vivant : la partie opérante avec le sous-système métabolique et l'unité de contrôle avec le sous-système de régulation.³⁷⁵

L'autre filiation se réfère aux concepts d'ensemble, de système organisé, de

³⁷³ Remarques de Szathmary : On ne sait pas si des critères fortuits ne sont pas inclus dans une définition. Mais la science repose sur l'observation et la manipulation du monde réel. En conséquence, toute construction axiomatique restera sujette à des reconsidérations si des observations supplémentaires nécessitent de revoir le premier point de vue. C'est pour cela que l'on parlera plutôt de critères de vie, que de définition de la vie.

³⁷⁴ Leibniz G.W., *Monadologie*. Déjà cité.

³⁷⁵ Il s'agit-là des concepts classiques de la théorie générale des systèmes que l'on retrouve également dans les approches de conception des systèmes d'informations sous la forme de système opérant et système de pilotage. Ils renvoient à la distinction « canonique » entre ce qui gère et ce qui est géré.

régulation, de finalité. Gánti fait fond sur les théories des systèmes développés par Ludwig von Bertalanfy.³⁷⁶ L'organisme y est conçu comme un ensemble organisé muni des propriétés d'un système. Cette organisation se définit soit dynamiquement, comme ensemble de relations qui se maintiennent et se construisent dans la durée ou encore sous une forme géométrique, comme ordre de la matière. Le système vivant chez Gánti est donc également l'analogie d'un système cybernétique contrôlé par un programme.

Cette analogie entre machine cybernétique et organisme est ici justifiée par le fait que le système vivant est un ensemble organisé dont les propriétés qualitatives résultent de l'arrangement interne des parties. Ce sont des systèmes dynamiques dont les caractéristiques d'ensemble ne se manifestent qu'à travers leur fonctionnement, leur mise en action. Ils consomment de l'énergie en transformant l'énergie externe en travail opérant. Au sein de ces systèmes les transformations ne seront pas arbitraires mais opèrent selon des chemins contrôlés et imposés.

Au-delà de ces similarités, Gánti pointe un certain nombre de différences fondamentales. Tout d'abord les systèmes vivants sont des systèmes souples, fluides. Puis, les machines restent des objets artificiels qui doivent être construits et mis en œuvre alors que les systèmes vivants se construisent et se réparent par leurs moyens propres. De plus, ceux-ci sont en croissance à l'inverse des systèmes techniques. Par ailleurs, l'évolution adaptative des systèmes vivants résulte d'un processus continu et spontané. Enfin, ce qui fondamentalement diffère entre organismes et systèmes non vivants, est que le travail des premiers est dirigé, programmé par une structure interne, alors que ce sont les conditions environnementales, externes qui sont source du travail réalisé par le deuxième.

Le *chemoton* s'inspire donc de la théorie des automates et de la cybernétique en l'adaptant à un milieu fluide. Les dispositifs de régulation n'y sont pas constitués par des matériaux solides organisés à cette fin et localisés spatialement comme le serait un capteur, un régulateur, un amplificateur etc. Ainsi pour réaliser la fonction exercée par un capteur, Gánti exploite les propriétés des équilibres chimiques du type : $A \rightleftharpoons B$ dont les

³⁷⁶ van Bertalanffy Ludwig, *Théorie générale des systèmes*. Bordas. Paris 1973 pour la traduction française.

concentrations respectives dépendent des conditions environnementales. Les concentrations de composants participant à l'équilibre chimique sont en effet fonctions des concentrations initiales, des constantes d'équilibres de la réaction, de la température, du pH etc. Ce sont donc de bons capteurs car la grande quantité de molécules mise en jeu dans ces réactions d'équilibres excluent selon Gánti les risques d'erreurs.³⁷⁷

Dans un « *automaton* » (mécanique), l'effet saisi par le capteur est transmis via la séquence de composants jusqu'à l'effecteur. Dans le *chemoton*, cette séquence est réalisée par une série de réactions successives, modifiables sous l'effet d'une perturbation physique initiale. La déformation des équilibres se propage alors dans toute la solution en agissant en tout point du réseau réactionnel. La notion de *feedback* est donc prise en charge par des cycles chimiques qui fonctionnent comme un système de rétroaction, l'amplification des signaux étant assurée par des processus auto catalytiques.

Une autre différence fondamentale entre organismes et machines réside dans la capacité des organismes vivants à se construire et se réparer par eux-mêmes. Dans « *The theory of self-reproducing automata* »³⁷⁸ Neumann et Burks (1966) ont développé les principes logiques de l'automate autoreproducteur. Un des problèmes rencontrés était de réaliser la description formelle d'un tout fini dans une des partie de ce tout et de pouvoir la transmettre par reproduction à un nouvel automate fini. Une telle description devait alors être aussi grande que le système lui-même. S'il devait en être ainsi, soit cette description ne pouvait être une partie propre du tout, soit la reproduction ne procédait pas d'une transmission intégrale de la description. C'est ce dernier schéma qui a été retenu (implicitement ou explicitement) par les biologistes : les systèmes vivants et leurs gènes ne contiennent pas la description totale de l'organisme. Le *chemoton* en tant qu'automate autoreproducteur, procède de même et dans certains cas produira des systèmes autoreproducteurs plus complexes que le système original.

³⁷⁷...ce qui lie la qualité du détecteur à un comportement statistique de type « grand nombre » qui ne doit pas toujours se rencontrer dans les cellules réelles dans lesquelles les exemplaires de molécules ne se comptent que par milliers.

³⁷⁸ Von Neumann J., Burks A.W., *The theory of self-reproducing automata*. *University of Illinois Press*, 1966

- ***La chimie support d'informations.***

Gánti recourt au concept d'information dans un sens particulier. Tout objet est porteur de plusieurs types d'informations. Par exemple, le fait qu'un livre est fait de papier etc., mais l'objet est également porteur d'un « surplus d'information », comme le contenu même du livre. Dans les systèmes étudiés par Gánti, ce surplus d'information est porté par un système de stockage de signes. Il s'agit généralement de tout ce qui est fixé dans l'espace et le temps afin de résister à l'environnement et être déchiffrable par un système de lecture approprié. L'information n'acquiert donc son statut que s'il existe un système capable de la lire et de l'utiliser. Elle peut être stockée selon deux modalités : par la quantité ou par l'ordonnement, la qualité de différents signes. (A l'exemple des phéromones dans les colonies de fourmis). Les molécules en tant que « signes » peuvent être liées entre elles par liaisons chimiques, par polymérisation. Gánti, en concevant son modèle, a eu recours à la polymérisation sur gabarit, la polycondensation comme support de l'information. Ainsi, le « patron » servant de support à la réaction de polycondensation jouera le rôle de polymère de référence, de molécule fichier. Au stade le plus élémentaire, l'information de régulation du *chemoton* sera portée par la longueur ou la taille de ce polymère et non par le type d'enchaînement des séquences. Au départ le contenu sémantique du dispositif restera donc limité et ne s'enrichira qu'avec l'apparition de séquences signifiantes dans ces macromolécules.

- ***Machines chimiques et thermodynamiques.***

Les réactions chimiques oscillantes (Type Belousov-Zhabotinskii : systèmes oscillants à base de férine, bromure, acide borique) témoignent pour Gánti des possibilités naturelles de réalisation d'horloges chimiques fluides dont les composants ne sont pas localisés spatialement. Ce système chimique continue d'ailleurs à exhiber la propriété oscillante après division. On peut ainsi imaginer des divisions répétées maintenant l'oscillation, comme une sorte d'image de la machine infiniment petite de Leibnitz.³⁷⁹ C'est

³⁷⁹ La division à l'infini d'une solution réelle ne peut bien évidemment être menée à son terme et doit être arrêtée à un stade où la quantité de molécules en jeu reste suffisamment grande pour que la réaction

sur cette base que Gánti élaborera le modèle de l'automate chimique, fluide, analogon de l'automate mécanique.

Le modèle est donc conçu en recourant aux réactions et couplages stœchiométriques des composants élémentaires à partir de leurs différentes voies de synthèse. Ce qui intéresse Gánti c'est mettre en évidence le principe d'ordre qui canalise l'énergie dans le système, depuis la consommation des nutriments jusqu'à l'expulsion des déchets en passant par tous les stades de son développement.

Gánti met donc l'accent sur les dispositifs spécifiques qui assurent et garantissent la canalisation des transformations énergétiques. Dans cette perspective, le *chemoton* modélisera le travail orienté et canalisé assurant la pérennité du système. Cette canalisation est réalisée dans une machine solide par le jeu de dispositifs mécaniques tels que rouages, ressorts etc., ou encore au moyen de dispositifs électriques et électroniques correctement disposés. Ainsi les roues de l'horloge, leur arrangement définissent-elles l'ordre orientant l'énergie mécanique. Il en est de même des instruments électroniques dans lesquels la circulation de l'énergie emprunte des trajectoires imposées. Dans un système en solution, par exemple un système chimique oscillant, l'ordre de déroulement des choses emprunte les voies dictées par la chimie. En solution, matière et énergie sont distribuées de façon homogène et uniforme et l'ordre des consommations énergétiques est imposé par celui des réactions chimiques, par leurs paramètres énergétiques propres (constantes de réactions, enthalpies libres de formation etc.). Il en est ainsi dans les systèmes vivants. La force motrice y est fournie par l'énergie chimique des nutriments et les flux de consommation d'énergie sont canalisés par des moyens chimiques. Il s'agit là d'une différence fondamentale entre machines et systèmes vivants autorisant des propriétés particulières comme la capacité à se former spontanément, à se régénérer, à se reproduire. Les systèmes vivants sont donc fondamentalement et nécessairement des automates chimiques.

Cependant, au sein du plus simple de ces automates, se déroulent simultanément

oscillante puisse être décrite statistiquement.

des milliers de réactions de telle sorte que chacune d'entre elles est en relation directe avec au moins deux, voire trois ou plus autres réactions. Elles sont ainsi connectées à toutes les autres, formant un réseau réactionnel complexe qui nécessite d'être appréhendé de manière appropriée, privilégiant les approches qualitatives dans l'obtention des résultats. De ce fait l'approche quantitative reposant sur les équations de cinétique chimique ne sera généralement pas accessible à la représentation mathématique en raison du grand nombre d'équations à décrire et de la limitation des capacités de traitement de ce type de système d'équations. Gánti fera alors abstraction des dynamiques temporelles pour ne modéliser que les seules structures fondamentales de l'organisation vivante élémentaire en recourant aux équations stœchiométriques générales d'équilibre des masses molaires. Avec cette approche, le modèle permet de simplifier les calculs en les ramenant à des opérations arithmétiques. Les équations stœchiométriques prendront chez Gánti une forme particulière par l'intégration de « *feedback* » stœchiométrique.

L'enchaînement des réactions constituant un cycle chimique (par exemple sur le modèle des cycles de Krebs se déroulant dans les mitochondries, celui de Calvin dans les chloroplastes des organismes photosynthétiques) dépendent des règles de la thermodynamique chimique (c'est-à-dire des enthalpies de réactions). Ce cycle conduit étape par étape à régénérer le réactif d'entrée, débutant alors un nouveau « tour » dans le cycle. Le métabolisme cellulaire est dès lors chez Gánti similaire à des milliers de rouages dont la différence avec les rouages mécaniques résulte uniquement du fait qu'il s'agit de chimie ordonnée au sein d'un champ d'états chimiques et non plus géométriques. Gánti s'autorise donc une analogie chimique de la machine dans laquelle chaque fin de cycle produit une molécule répétant à nouveau le cycle comme le ferait le tour supplémentaire du rouage d'une machine, assurant in fine la mobilisation de l'énergie dans le sens désiré. On imagine également aisément des processus de proliférations liés à la multiplication de « tours » de cycles.

3.2.3 Le *chemoton* et son rapport avec la réalité saisie par les sciences de la vie

- *Le chemoton comme modèle unifiant un ensemble de modèles naturels.*

Quelle est la vocation théorique du modèle de vie développé par le *chemoton* ? Les rapides aperçus d'une démarche foisonnante et profonde³⁸⁰ montrent que l'on est loin de la réalité saisie, analysée, théorisée par les sciences de la vie. C'est par exemple la catalyse enzymatique si prégnante dans l'intégralité du monde vivant qui n'est pas prise en compte par le modèle. Par ailleurs, le formalisme adopté qui lie de manière rigide trois fonctions majeures : métabolisme, régulation, séparation spatiale, ne saurait constituer la loi physiologique régissant dans le monde vivant réel, les rapports complexes entre les systèmes rendant possible l'activité cellulaire.

Il s'agit donc d'un modèle abstrait du système vivant élémentaire, le plus simple possible, satisfaisant aux critères de vie absolus (cf. paragraphes précédent). Les fonctions enzymatiques y ont été évacuées, et ne seront acquises que par l'évolution du *chemoton* primitif vers un stade plus développé incorporant ces fonctions. Le modèle de l'unité élémentaire de vie n'a dès lors pas vocation à réaliser une photographie réaliste mais à être un support heuristique permettant de poser les « bonnes questions ». Cette vocation heuristique se décline sur deux plans. D'abord, par sa disponibilité pour des investigations via simulations sur ordinateur, le modèle réalise concrètement la synthèse des apports de différentes disciplines scientifiques à l'éclairage de la compréhension du vivant, des phénomènes vivants. Et au-delà de cet aspect utilitaire, le travail de Gánti présente un intérêt théorique majeur qui va au-delà d'une construction d'ingénieur qui partant d'un cahier des charges : les critères de vie ; des contraintes à satisfaire : la nécessaire cohérence avec les approches scientifiques majeures de la biologie et de ses disciplines connexes ; des

³⁸⁰ Deux ouvrages techniques développent le détail de la théorie du chemoton : Gánti T. *Chemoton Theory vol1. Theoretical foundations of fluid machineries*. Kluwer Academic/Plenum Publishers. 2003. Et *Chemoton Theory Vol.2. Theory of living systems*. Kluwer Academic/Plenum Publishers. 2003

obstacles à éviter : facilité d'emploi de l'outil, robustesse, souplesse ; développerait l'outil le plus adapté à réaliser des simulations.

Gánti ne visait rien moins que la refondation de la biologie autour de ce qui s'apparente à une définition stipulative de la vie. Autour du *chemoton*, c'était en effet l'ambition de développer une théorie unitaire de la vie révélant ses lois par la constitution d'une biologie exacte et théorique fondée sur des modèles abstraits. Il s'agissait de dépasser le côté expérimental, empirique de la biologie pour fonder une science exacte. En partant de la théorie du *chemoton*, le but était de construire et développer d'autres modèles appropriés à la compréhension des systèmes complexes de la vie sur terre. Il s'agissait d'initier un mouvement de formalisation et de modélisation autorisant des approches « exactes » au moyen de systèmes logico formels afin de réaliser des déductions comme dans la mise en place des fonctions d'un système souple d'apprentissage, ou la modélisation d'eucaryotes.

L'ambition affichée vise également l'élaboration d'un modèle capable de rendre compte de toutes formes de vie et pouvant servir de guide aux approches de biologie synthétique. Ainsi, en ayant théorisé les caractéristiques principales des systèmes vivants, un projet de création de vie artificielle disposerait alors des conditions de possibilités de sa réalisation effective. Le modèle du *chemoton*, que Gánti nomme théorie du *chemoton*, sert donc de fil conducteur ayant vocation à donner sens aux différentes expériences et observations menées dans cette perspective.

L'unité fondamentale de la biologie modélisée par le « *chemoton* », possède les propriétés spécifiques suivantes : elle fonctionne sous la direction d'un programme, elle peut se reproduire et elle est séparée de son environnement. Le modèle, en mettant en scène le couplage nécessaire de trois sous-systèmes à travers leur stœchiométrie qui en organise le partage entre composés produits par l'un et consommés par l'autre, ne fait pas référence à une matière déterminée. Il permet de prendre de la distance par rapport au réalisme naturaliste pour aborder les questions de la vie sous d'autres incarnations, ou implémentations matérielles. (Par exemple la chimie du silicium).

Par ailleurs, même si la « synthèse totale » du vivant reste encore inaccessible,³⁸¹ elle demeure un projet en tant que tel qui permettrait selon l'auteur du *Chemoton* d'en valider le contenu théorique. Le modèle de vivant élémentaire acquerrait en somme le statut de la synthèse chimique, « preuve », à travers ses résultats, de la validité des théories physico chimique. En effet, la synthèse valide par l'acte même de création réussie, la théorie qui a permis de concevoir une molécule, une nouvelle voie de synthèse etc.

Néanmoins, c'est également à partir de ce modèle abstrait que pourront être élaborés des modèles plus réalistes, par le recours direct aux composés organiques réels ou réalistes, notamment ceux supposés avoir participé à la formation d'organisations matérielles, préfigurations dans des conditions pré biotiques des vivants actuels.

- ***Les sciences de la vie et le système vivant minimal.***³⁸²

Pour autant cette démarche de modélisation n'est pas indifférente à la réalité décrite par les sciences de la vie. C'est bien évidemment celle d'entités vivantes simples, les procaryotes et leurs mécanismes de fonctionnement dont on s'inspire en partant de leurs traits les plus caractéristiques. Mais elle se nourrit également de toutes les connaissances acquises en matière de chimie du vivant relatives à des structures chimiques particulières : cycles catalytiques naturels, polymérisation par condensation sur matrice,

³⁸¹ Sydney Fox et Krishna Bahadur ont tenté cette expérience de biogenèse directe : formation de protéinoïdes chez le premier, de microsphères à partir de composés organiques et non organiques (molybdène) chez le deuxième pour constituer un *jeewanu* (particule de vie en sanskrit). Partant de la théorie du *chemoton* qui lui fournit les critères de discrimination vie/non vie, Ganti conclue cependant que ces structures ne satisfont pas aux critères de vie car ils ne métabolisent pas et parce que leur régulation ne résulte que de conditions externes. Elles ne font que montrer la possibilité de création spontanée du sous-système membranaire sous des conditions primitives. Le *jeewanu* possède au moins deux des sous-systèmes identifiés dans le *chemoton*. Ces deux approches permettent cependant de concevoir une approche de synthèse totale d'une structure vivante. Le problème restant à résoudre est la formation du super système à partir de trois sous-systèmes connectables (et non seulement compatibles).

Voir : Grote Mathias. Jeewanu, or the 'particles of life'; The approach of Krishna Bahadur in 20th century origin of life research. *Journal of Bioscience*, 2011 :36(4)

Fox, S.W., Synthesis of Life in the Lab? Defining a Protoliving System. *The quarterly Review of Biology*, 1991, 66 (2)

³⁸² Le concept de système minimal conçu dans une perspective réductionniste (ou physicaliste) a été traité par Morowitz et al., The chemical logic of a minimum protocell. *Origins of life and evolution of the biosphere*. 1988: 18, 281-7

etc.

- *Le chemoton et la cellule vivante.*

En visant la structure fondamentale du vivant élémentaire le modèle du *chemoton* met entre parenthèse certaines propriétés des cellules vivantes. Il s'agit notamment de la régulation enzymatique qui n'y apparaît pas comme fonction première et essentielle du vivant. Sur le fond celle-ci n'est, dans le contexte du modèle, qu'un processus accélérant les réactions déjà existantes. L'intégration d'un système de régulation enzymatique dans des versions plus élaborées du *chemoton* constitue dès lors un champ d'investigation particulier. L'intégration d'un système de ce type est conçue comme résultant du passage d'un *chemoton* primitif, régulé par la quantité de monomères incorporables dans le sous-système de régulation organisé autour de la polycondensation sur matrice (c'est à dire également par la quantité de signes incorporés dans le système), vers un système développé régulé par la présence de séquences significantes d'enchaînements de nucléotides dans le polycondensat. C'est en conséquence la capacité de mutations du *chemoton* qui déterminera cette évolution, autorisant alors le stockage de l'information sous la forme de « mots », de combinaisons de signes, ouvrant des perspectives nouvelles de régulation. Sur le plan de la simulation formelle, on recourt aux perspectives ouvertes par les polycondensats de type ARN qui associent deux fonctionnalités: stockage d'information et l'activité catalytique.

- *La vie au niveau procaryote : le chemoton comme représentation d'une forme élémentaire de vie.*

Chez Gánti, le secret de la vie portée par le *chemoton* doit pouvoir être établi au niveau le plus primitif, celui des procaryotes, les plus simples étant les thermoplastes et les mycoplasmes. Gánti retrouve dans ces organismes élémentaires les exemples concrets de systèmes matériels fluides circonscrits par une membrane à deux dimensions. En négligeant cependant les structures sous-jacentes au cytoplasme, la comparaison avec les formes naturelles élémentaires s'organise autour d'une description phénoménologique réduite. Gánti appréhende dès lors ces organismes vivants comme réalisant le même « plan » organisationnel que le *chemoton*. La différence entre modèle et réalité réside alors dans les seules modalités de réalisation technique de ce plan : techniques du contrôle, membrane semi perméable comme complexe formé d'une double couche de lipides et de protéines assurant séparation et échange avec l'environnement. Et au sein du milieu

circonscrit par cette membrane on retrouve bien les deux autres sous-systèmes du *chemoton* : le cytoplasme et le matériel génétique. Le cytoplasme correspondant au sous-système métabolique consiste en réseaux de métabolites synthétisant les composés chimiques nécessaires au travail du système et à la reproduction de l'ensemble. Ces composés entrent également dans la synthèse de la membrane et du matériel génétique.

Le monde des procaryotes est extrêmement diversifié. Mais la construction fondamentale en trois sous-systèmes reste présente dans chacune des espèces, et ce n'est qu'à travers l'évolution que d'autres sous-systèmes (flagelles...) ont été rajoutés sans que cela perturbe la coordination entre les trois sous-systèmes fondamentaux.³⁸³ Gánti conclut dès lors que le modèle du *chemoton* constitue bien la représentation adéquate des systèmes procaryotes, et affirmera que tout système vivant aussi élémentaire soit-il, possède un sous-système consistant en un réseau métabolique auto catalytique produisant les matériaux bruts nécessaires à la formation de la membrane et permettant de reproduire le sous-système informationnel ou sous-système génétique, ces deux derniers sous-systèmes étant eux même auto catalytiques et auto reproductibles.

In concreto, Gánti valide ainsi l'hypothèse constitutive du concept de vie minimale : la nécessaire présence de trois sous-systèmes coopératifs. Sous ce rapport, les virus, en raison de l'absence de système métabolique, ne seront pas considérés comme vivants. Il en sera de même après la suppression des membranes (lyse) de procaryotes, qui tout en conservant la capacité à assurer des synthèses biochimiques en raison du maintien de leur réseau métabolique, ne peuvent plus proliférer et croître.

- *La vie au niveau animal. Le chemoton et les formes élaborées de vie. Vie primaire et secondaire.*

L'expérience biologique, médicale permet d'identifier deux sortes de vie : celle de l'organisme complexe et celle de la cellule élémentaire. Mais après la mort d'un organisme complexe, certains organes, des tissus, des cellules restent vivants durant un certain temps.

³⁸³ Rien n'indique cependant sur le plan empirique que les « autres » sous-systèmes que Gánti considère acquis à travers l'évolution, ne sont pas indispensables à l'existence de toute forme de vie.

(D'où la possibilité de greffes d'organe, de cultures cellulaires etc.) Cette différence introduit à la conception de deux types de vie : celle de l'animal et celle de ses cellules.

Ainsi à l'exemple des métazoaires dont les éléments de base sont des cellules vivantes formant ainsi un super système biologique, le modèle développé par Gánti nous introduit à un autre type de vie que celle de l'unité élémentaire. Elle est caractérisée par la présence de cellules qui sont elles-mêmes des entités vivantes. Dans le modèle du *chemoton* la vie est toujours la propriété d'une entité élémentaire.³⁸⁴ Or avec des systèmes biologiques comme les métazoaires, dont les éléments de base sont des cellules vivantes, on accède à un autre type de vie caractérisé par la formation d'une entité nouvelle à partir d'entités primaires de vie. Ce type de vie relève de ce que Gánti appelle la vie secondaire, dans laquelle se retrouvent homothétiquement les trois fonctions fondamentales du *chemoton* : un sous-système qui régit la structure géométrique (peau, squelette...), un autre qui régit le processus métabolique (tractus digestif, organes sécréteurs, circulation sanguine...) et enfin un troisième sous-système d'information et de contrôle (système nerveux) qui garantit la coordination opérationnelle des organes. L'animal vivant présente donc à chaque instant de son existence ces deux formes de vies : celle primaire de ses cellules, celle secondaire de son corps. Gánti note que la vie de l'animal débute avec la vie primaire et non avec la vie secondaire.³⁸⁵

On notera encore que l'extension du modèle du *chemoton* à l'ensemble du vivant conduit à une prise de distance par rapport à la chimie : les trois sous-systèmes fondamentaux ne sont donc plus nécessairement des sous-systèmes chimiques mais des unités fonctionnelles, nécessairement liées entre elles par des relations de coopérations fondamentales. Et le couplage stœchiométrique du modèle de vie primaire n'a alors plus

³⁸⁴ Remarque de Szathmary (Dans « *The principles of Life* » déjà cité.) : Ganti ne fournit pas d'explication de quelque chose qui mérite attention, celui du concept d'individualité. En suivant Santelices (1999) trois critères concourent à définir le concept d'individualité : i) homogénéité génétique ii) unicité génétique iii) autonomie, ce qui par combinaison conduit à 8 types d'individualités possibles. Avec Gánti on peut rajouter une caractéristique complémentaire pour qualifier un ensemble d'organisme, c'est celui de la présence ou non d'un sous-système de contrôle. Mais on ne traite pas encore de la différence essentielle qui selon Szathmary est celle du type de sous-système ou de son organisation : centralisée ou en réseau. Voir une revue actualisée des problématiques d'individualité biologique : Clarke Ellen. *The Problem of Biological Individuality. Biological Theory* 2011, 5. (4):312-325 (2011).

³⁸⁵ Cela est contestable, les mécanismes du développement opèrent à un stade très élémentaire.

de sens dans cette configuration.

- *Entre animaux et procaryotes.*

Une partie importante du monde vivant se situe entre procaryotes et métazoaires : cellules eucaryotes, moisissures, plantes. L'organisation générale des eucaryotes reste encore conforme au modèle du *chemoton*. Ce type de cellule n'a pas de vie secondaire dérivant de la vie primaire. Le fait que leur sous système d'information soit contenu dans un compartiment spécial (noyau avec membrane) n'est pas contradictoire avec le modèle du vivant élémentaire. En effet, le modèle ne parle que des relations stœchiométriques et non de l'organisation spatiale. Cependant la présence d'organelles possédant leur propre information génétique (chloroplastes ou mitochondries), expliquée par un phénomène d'endosymbiose, peut poser problème pour cadrer avec le modèle général du *chemoton*.

Les moisissures et plantes présentent une situation intéressante. Ces organismes vivants disposent de deux sous-systèmes, l'un gouvernant la structure géométrique et l'autre le processus métabolique et la connexion entre les deux, correspond bien aux exigences du modèle du *chemoton*. Mais, à l'instar des animaux, les composants de construction ne résultent pas directement des réactions chimiques de l'un des sous-systèmes connectés aux deux autres, mais de cellules possédant leur propre vie primaire. En raison de l'absence de sous-système d'information propre à l'organisme, Gánti n'y identifie pas de vie secondaire et en conclue que la vie des moisissures ne résulte que de la coordination des vies primaires des cellules.³⁸⁶

Au-dessus de l'organisme animal, la coopération peut conduire à la formation de super organismes tels que les nids de fourmis etc. Gánti y repère également deux des sous-systèmes du *chemoton*.

Le modèle sert ainsi de fil conducteur à l'analyse de l'intégration vers les niveaux de complexité plus élevés. Il est organisé autour de la connexion fonctionnelle de sous-

³⁸⁶ Gánti note d'ailleurs que le langage courant révèle bien ces différences fondamentales et structurelles entre animaux et plantes : les langues humaines utilisent les mots de « tuer un animal » alors qu'aucune ne parle de tuer les plantes ou les moisissures.

systèmes portant trois catégories de propriétés qualitatives, réalisant par leur dynamique les grandes fonctions caractéristiques du vivant. L'évolution vers des systèmes plus complexes se conçoit alors comme un processus de raffinement des degrés d'organisations hiérarchiques, évoluant du plus simple vers le plus organisé : la cellule eucaryote formée à partir de quelques types de cellules procaryotes par phagocytose, l'organisme multicellulaire par l'assemblage de cellules eucaryotes, la communauté animale par l'organisation d'individus multicellulaires etc.

- ***Ancrage des systèmes auto catalytiques dans la réalité chimique.***

Avec le *chemoton*, on dispose du support théorique permettant de mieux saisir les transitions d'un niveau de la hiérarchie organisationnelle vivante à une autre, de la vie cellulaire à la vie multicellulaire et finalement de la transition de la non vie à la vie. Ainsi parler d'un monde ARN comme étape de l'évolution menant vers la vie telle que nous la connaissons, signifie que les molécules d'ARN sont aptes à fournir les composantes nécessaires à la réalisation de ces trois sous-systèmes. De même, penser comme vivant tout super organisme nécessite d'y identifier ces trois sous-systèmes.

Parmi les trois sous-systèmes intégrés au sein du *chemoton*, celui du cytoplasme semble être le plus complexe pour Gánti. Celui-ci opère en tant que moteur chimique et est au fondement du système homéostatique. Les processus s'y déroulent de manière ordonnée et délivrent les matériaux de base nécessaires à l'ensemble vivant. L'examen microscopique du cytoplasme d'amibes ou de *vallisneria spiralis* durant la photosynthèse révèle l'aspect tourbillonnant de leur cytoplasme que Gánti assimile à un automate fluide divisible sans altération de ses capacités.³⁸⁷ Le cytoplasme est donc une sorte de machine qui n'est pas perturbée par des agitations moléculaires.³⁸⁸ Dans ce système fluide, l'énergie utilisée consommée est véhiculée par les processus chimiques. Le cytoplasme constitue

³⁸⁷ Gánti fait ici référence aux expériences de Hartmann, biologiste allemand, qui avait étudié l'effet de l'élimination d'une partie du cytoplasme d'une amibe sur sa vitesse de reproduction. Voir compte rendu dans: Nurse Paul, Yoshio Masui and cell cycle control, past, present and future. *Biology of the Cell* (1998) 90, 447-452

³⁸⁸ Vision simpliste selon Szathmary, ne tenant pas compte de l'existence d'un cytosquelette dans le cytoplasme.

également le sous-système homéostatique de la cellule, qui compense par sa capacité de réponse dynamique l'influence du monde extérieur. Il est également le support de la sensibilité et de l'excitabilité de l'ensemble.

Une des fonctions de la membrane cellulaire est de maintenir le cytoplasme. Elle crée les conditions « géographiques » de réalisation du système souple, car la distance entre chacune des parties qui le compose reste inférieure à la portée maximale d'interactions qui l'organise en un système unique. La mise en œuvre de ces systèmes souples est donc largement tributaire de la présence de cette membrane. Elle est imperméable à ses propres substances tout en autorisant l'entrée et la sortie de celles nécessaires au métabolisme et à l'élimination des déchets. Elle a une double fonction d'isolement et d'ouverture contrôlée.

Enfin, la « substance génétique » a pour rôle de stocker l'information et de contrôler les processus vivants. Ce matériel génétique contient le programme qui au cours du développement de la cellule se présente comme une séquence unidirectionnelle d'évènements.

- *Cycles auto-catalytiques et analogons chimiques des sous-systèmes.*

Le rapprochement du sous-système métabolique avec un cytoplasme réduit ou idéalisé sous forme de moteur chimique autoreproducteur paraît évident. Mais en l'absence de catalyse enzymatique, il est nécessaire de le constituer autour de systèmes auto-catalytiques capables de catalyser leur propre synthèse afin de permettre l'accumulation de matière ainsi que la croissance de l'ensemble du système. Les sources d'inspirations de tels systèmes chimiques organisés en cycle sont multiples.

Ce sont par exemple ceux issus de systèmes réels comme le cycle de formose (polymérisation du formaldéhyde et formation de sucres dont du pentose), le cycle de Calvin (ou cycle de l'acide malique de phosphorylation de l'adénine en adénosine triphosphate), le cycle de Krebs (réduction de l'acide citrique etc.). On retrouvera de même un autre analogue biologique avec le cycle de l'ATP (adénosine triphosphate), transporteur d'énergie universel, engagé dans les processus auto catalytiques de transfert d'énergie. Ces cycles restaurent en fin de réaction le même type de molécules que celui utilisé au début. Ils fonctionnent au prix d'apport d'énergie externe portée par les nutriments. Les résidus du cycle possèdent une énergie totale inférieure à ceux des

nutriments.

Gánti s'est également inspiré du système oscillant de Belousov-Zhabotinsky,³⁸⁹ système qui, sous une certaine perspective, est analogue à une horloge. Le modèle de cet oscillateur chimique met en effet en exergue deux sous-systèmes auto-catalytiques, soit l'image de deux « roues », dont le couplage produit l'effet global d'oscillation synchrone. Le premier sous-système duplique l'ion bromite BrO_2^- , le deuxième duplique l'ion hypobromite BrO^- . Le couplage entre les deux leur permet de ne pas croître exponentiellement mais d'osciller. (On retrouvera un autre modèle, analogue d'un système oscillant au cours du temps, dans le système proie-prédateur modélisé par Lotka Voltera).

3.2.4 Le *chemoton* objet philosophique

- ***Définition de la vie et unité individuelle***

Le *chemoton*, représentation du vivant élémentaire, est à la fois support d'une définition de la vie et de critères distinguant animés et inanimés. Ces critères présentent bien évidemment un degré d'arbitraire et dans cette perspective le *chemoton* ne constitue pas une théorie, un ensemble de propositions falsifiables. Dans un premier temps ces critères ne renvoient pas à une essence de vie mais à une définition opératoire ordonnant les approches foisonnantes de la vie et ouvrant de nouvelles perspectives de compréhension. Néanmoins l'inscription d'une organisation de principe dans un modèle qui a vocation à rendre compte de toute forme de vie permet d'aller au-delà de la simple définition pratique, opératoire, pour viser quelque chose de plus fondamental qui participerait de l'essence du vivant.

Ainsi le vivant se construit ici autour d'une contrainte fondamentale : la nécessaire coopération de trois sous-systèmes dont l'un, le sous-système membranaire, crée les conditions de possibilité d'individuation d'un système matériel. Cette union fondamentale

³⁸⁹ L'article du *wikipedia* anglais introduit de façon succincte et précise la nature de ce système réactionnel. Il s'agit pour l'essentiel d'un système oscillant comportant un acide et un composé du brome. Les réactions sont loin de l'équilibre thermodynamique durant toute une durée accessible aisément à l'observation humaine. Ce système constitue un modèle des phénomènes biologiques de non équilibre.

et nécessaire rend possible la manifestation des propriétés vivantes. L'entité matérielle ainsi constituée exhibe des propriétés nouvelles qui résultent des interactions entre parties. La qualité d'entité nouvelle témoigne des critères de non additivité des parties et de non divisibilité du tout.³⁹⁰ Gánti va par-là, au-delà d'une opération logique de sommation ou de fusion méréologique d'union d'éléments ou parties physiques.

Il s'agit d'un trait fondamental, qui rend compte de l'internalisation d'une capacité à agir. Le système matériel ainsi organisé acquiert une capacité d'évolution de par la permanence même de son organisation interne. Il peut être sa cause d'évolution par la capacité à s'adapter et à réagir à l'environnement. Il devient dès lors sa propre source d'actions, alors que tout autre système n'est régi que par le seul jeu des contraintes externes. Cette internalisation de capacités d'agir semble aller au-delà des apparences pour renvoyer à une donnée essentielle du vivant : sa capacité propre à évoluer au sein de l'environnement, elle est liée à l'individuation de la structure vivante.

L'approche de Gánti ne rejoint pas les définitions du vivant centrées sur les seules capacités de réplication et de mutation, à l'exemple de celle proposée par Oparin (1961) : est vivant tout système capable de réplication et mutation. La définition du vivant repose chez Gánti sur une contrainte structurelle : la présence de trois fonctions majeures interdépendantes. Les simulations menées à partir du modèle conduisent alors à faire de la capacité d'évolution une propriété résultante du fonctionnement même de l'automate fluide. Cette différence introduit une approche qui met en scène deux types d'unités : les unités de vie et les unités d'évolution, pendant des deux familles de critères, absolus et potentiels, présentées précédemment. Les unités d'évolutions peuvent se multiplier, posséder des caractères héréditaires présentant un degré de variabilité affectant, pour certains d'entre elles, les probabilités de reproduction ou de survie de l'unité. Lorsque toutes ces caractéristiques sont réunies, l'évolution par sélection naturelle peut prendre

³⁹⁰ Griesemer parle d'une propriété émergente résultant du comportement dynamique des trois sous-systèmes couplés stoechiométriquement : *The principles of life : the philosophical significance of Gánti's work*. Ouvrage déjà cité.

place dans une population d'entités de ce type.³⁹¹ Et la définition portée par le modèle peut s'appliquer à tout système qui répondant à ces critères évoluera de façon darwinienne.

Cependant, la reproduction n'est ni nécessaire ni suffisante pour définir l'état vivant individuel. De nombreuses cellules et organismes sont communément considérés comme vivants même s'ils ne peuvent plus se «reproduire». (Stériles, mules etc...). La différenciation des critères de vie, en critères absolus applicables aux unités élémentaires de vie et critères potentiels applicables aux populations, aux regroupements d'unités élémentaires, livre une solution élégante à ce paradoxe. Une entité unitaire, individuelle sera vivante au regard des seuls critères de vie absolus - n'y incluant pas la reproduction -, mais dès lors que l'on déporte le regard vers l'évolution de toute la biosphère, c'est l'ensemble des critères qui devra être pris en compte.

Se fait jour une notion de vie, qui est encadrée par des définitions à géométrie variable, en relation avec le champ disciplinaire auquel elle sert. On pourrait par exemple concevoir un système de vie artificiel en dehors de tout processus évolutif, qui ne serait pas doté de capacités de reproduction et qui pourrait être considéré comme vivant.³⁹²

- ***Chemoton et origine de la vie***³⁹³

Une question fondamentale, l'origine de la vie, est révélatrice de l'état des disciplines des sciences de la vie. La biologie pendant longtemps n'a pas souhaité répondre à cette question qui semblait hors d'atteinte explicative. Les pistes proposées, ancrées dans une matérialité élaborée dans le contexte d'une science naissante les sources de la vie : composés organiques au 18^e et début du 19^e siècle, protoplasmiques durant

³⁹¹ Maynard Smith John, (1986) *The problem of biology* .Déjà cité.

³⁹² La configuration « jardin d'Eden » de certains systèmes d'automates cellulaires pourrait en être un modèle approché.

³⁹³ Les éléments techniques qui permettent d'établir les scénarios élaborés par Gánti sont résumés dans le but de mettre en valeur l'essentiel nécessaire à notre propos : l'utilisation du *chemoton* pour interroger et proposer ces scénarios. Sur certains aspects de la chimie pré biotique ils pourront paraître simpliste voir réducteurs par rapport aux démarches exposés en détails dans l'œuvre de Gánti et de ses collaborateurs.

le 19^e siècle, protéines au 20^e siècle, structures infra cellulaires puis l'ADN et son information génétique.

Dans les 30 dernières années, plus d'une centaine de symposiums, conférences, congrès traitant de l'explication scientifique de la genèse de la vie se sont tenus.³⁹⁴ Une revue s'est spécialisée sur la genèse de la vie : « *Origins of life and evolution of biospheres* ». On y aborde la formation spontanée de composés organiques : acides aminés, sucres, bases nucléotidiques..., la formation de macromolécules ou encore celle du code génétique. Mais on y traite plus rarement de l'origine même de la vie, c'est-à-dire de la formation d'unités matérielles organiques, sauf comme introduction philosophique et convenu d'exposés spécialisés. Quelques expériences ont néanmoins tenté d'aborder cette origine. Ce sont par exemple les expériences de Fox (microsphères), les formations pré biotiques de Folsome, le « Jeewanus » de Bahadur.³⁹⁵

Tout se passe comme si personne ne «savait» réellement ce qu'est la vie. L'analyse se focalise alors sur la formation des composantes matérielles élémentaires en espérant que le « reste », ce qui constitue le système vivant en découle nécessairement. Le schéma de raisonnement est le suivant : dès lors que les conditions appropriées existent, les systèmes vivants émergeraient spontanément. La vie serait dès lors comme la conséquence nécessaire d'un état global de la terre, autorisant la matière à s'organiser par étapes en systèmes vivants (Selon des mécanismes et des temporalités restant à établir...). Dans ce contexte, le *chemoton*, modèle de vivant élémentaire permet de concevoir un avant pré biotique et un après biologique. Le *chemoton* pourrait alors acquérir le statut d'objet théorique, support d'une histoire possible du vivant. Gánti se revendique des travaux d'Oparin et d'Haldane³⁹⁶ pour concevoir une abiogenèse dans des conditions qui diffèrent notablement de celles des organismes vivant contemporains.

³⁹⁴ De Duve Christian, *Blue Print for a cell: the nature and origin of life*. Burlington. North Carolina: Neil Patterson Publishers.1991.

³⁹⁵ Déjà cité.

³⁹⁶ Oparin A.I., *The Origin of life*. Disponible sur

<http://www.valencia.edu/~orilife/textos/The%20Origin%20of%20Life.pdf>

Haldane J.B.S., *The Origin of Life*. Disponible sur : <http://www.uv.es/~orilife/textos/Haldane.pdf>

Le modèle conduit à réinterroger l'origine même de la vie. Il permet de concevoir trois voies d'accès au vivant tel que nous le connaissons : une voie métabolique, une voie membranaire, une voie « gabarit » ou polymérisation sur matrice.

Pour valider ces approches il est nécessaire de concevoir une évolution chimique, un processus abiotique susceptible de mener à la formation du premier système vivant. Ce processus a été conçu par Gánti comme une succession d'étapes débutant par la formation de composés organiques à partir de composés primaires. L'étape suivante consiste à examiner les conditions de formation spontanée des sous-systèmes incorporables dans un *chemoton* à partir de ces composés primaires et *in fine*, comme un résultat quasi nécessaire dès lors que toutes les conditions sont réunies, l'union de ces sous-systèmes pour enfin constituer le super système, le *chemoton*.

Dès le départ, ce processus évacue la catalyse enzymatique (pour, dans certaines hypothèses de travail envisager des catalyses minérales) en raison même des difficultés à concevoir la synthèse spontanée de polypeptides de taille suffisante et de structure spécifique susceptibles d'accélérer les réactions fondamentales du *chemoton*. Wächtershäuser avait également développé l'idée d'une évolution chimique continue fondée sur la formation de réseaux autocatalytiques et ce avant la formation d'enzymes et de matrices de réplication.³⁹⁷

Ce n'est que dans une version plus développée qu'interviendrait, selon Gánti, la catalyse enzymatique. A partir des suggestions de Woese (1967), Crick (1968), Orgel (1968), White (1976),³⁹⁸ Gánti concevra un *chemoton* (1979) intégrant ces capacités catalytiques. Ce rôle sera assuré par l'ARN au sein du sous-système génétique. Le *chemoton* permet dès lors de construire un pont entre les idées développées par Walter Gilbert d'un monde ARN,³⁹⁹ celle de White (1976) supposant que l'ARN pouvait être le fossile d'une

³⁹⁷ Wächtershäuser G., Before enzymes and templates: theory of surface metabolism. *Microbiology Review*, 1988, 52, 452-84.

³⁹⁸ Woese C.R., *The genetic code*. Harper & Row, New York, 1967

Crick F.H.C. ,The origin of the genetic code. *Journal of Molecular Biology*, 1968, 38, 367-79.

Orgel L.E., Evolution of the genetic apparatus. *Journal of Molecular Biology*, 1968, 38,381-93.

White H.B., Coenzymes as fossils of an earlier metabolic stage. *Journal of Molecular Evolution*. 1976, 7,101-4.

³⁹⁹ Gilbert Walter, Origin of life: The RNA world. *Nature*, 1986, 319, 618.

étape métabolique primitive.

Reste cependant à examiner plus finement dans quelle mesure le *chemoton* peut être le support d'une histoire évolutive articulant l'évolution pré biotique (= pré *chemoton*) avec la formation de systèmes matériels relevant du *chemoton* primitif, propre ensuite à évoluer vers une organisation plus complexe (Le *chemoton* développé).

- *Vers la genèse du chemoton primitif*

La genèse de chaque sous système a fait l'objet d'approches empiriques, voire formelles, rendant compte de l'apparition spontanée de cycles auto catalytiques. Selon Gánti, la formation spontanée de telles structures en milieu aqueux relève plus du déterminisme chimique que du pur hasard. La formation d'une structure matérielle décrite par le modèle du *chemoton* relèverait en somme d'un processus nécessaire qui rendant le développement de la vie calculable et reproductible. L'auteur du *chemoton* développe ainsi une série d'arguments étayant cette approche.

Dans les premières étapes vers la vie, l'ATP étant vraisemblablement absente, les hypothèses envisagées permettant d'expliquer la formation des premiers réseaux métaboliques exploitent les séquences structurantes de la réaction de formose, notamment le rôle du formaldéhyde. Ce composé relativement commun dans l'univers pouvait être en effet présent dans l'atmosphère primordiale de la terre. Il paraît alors vraisemblable que la réaction de formose ait été l'une des réactions chimiques présente sur la terre primitive. Elle est au cœur de la formation des trois sous-systèmes auto-catalytiques susceptibles de préfigurer les systèmes composant le *chemoton*. Il s'agit donc de cycles auto-catalytiques de synthèse du sucre (dont le ribose), des différentes possibilités de polymérisation sur gabarit recourant à un polymère de type ribose-phosphate dont le ribose assurerait le lien entre les deux sous-systèmes.

La formation spontanée du sous-système métabolique, dont le paradigme est le processus auto-catalytique de formation de sucre à partir de formaldéhyde, semble pour

Gánti hautement probable, malgré la formation de réactions indésirables en l'absence de catalyse enzymatique. On sait par ailleurs⁴⁰⁰ que la viabilité d'un cycle à n étapes croît hyperboliquement avec la spécificité des réactions, d'où vraisemblablement l'importance du rôle de la catalyse sur des surfaces minérales. A défaut, le système auto catalytique primaire devait être plutôt petit en taille.

Le sous-système membranaire pose d'autres problèmes. Bien que de nombreuses expériences attestent des possibilités de formation spontanée d'une membrane à deux dimensions, il n'existe aucune étude chimique qui les concerne. En fait, il n'existerait pas d'évènement chimique conduisant à la formation d'un sous-système membranaire. La formation spontanée d'une membrane phospholipidique paraît délicate à concevoir, mais en se référant aux travaux de Sydney Fox (1991) concernant les protéinoïdes, Gánti affirmera la faisabilité de la genèse d'un tel sous-système.

Enfin s'agissant du troisième sous système, les choses paraissent encore plus problématiques. Aucune donnée expérimentale, à ce jour, ne permet d'élaborer un scénario de synthèse d'acides poly nucléiques par un mécanisme de polymérisation sur gabarit en l'absence d'enzymes. Une telle polymérisation s'arrête systématiquement au stade d'oligomère comportant peu de nucléotides. (En présence de surface d'argiles, agissant comme catalyseur, la polymérisation peut être poussée jusqu'à 50 nucléotides). Cependant, en pesant différentes considérations tant théoriques qu'empiriques Gánti conclura que le sous-système d'information pouvait avoir une origine et un fonctionnement primitif sans enzymes. Par exemple en partant de degrés de polymérisation faibles (4 ou 5 nucléotides), la séparation spontanée d'un double brin sous l'effet de la concentration reste concevable.

Mais par ailleurs, la compatibilité des sous-systèmes du *chemoton* avec des schémas vraisemblables de chimie pré biotiques n'est pas synonyme de formation spontanée du super système. Celui-ci est le produit des connexions nécessaires des trois sous-systèmes constituant le *chemoton* via un mécanisme de couplage réactionnel autorisant alors leur mise

⁴⁰⁰ King, G.A.M. Was there a prebiotic soup? *Journal of Theoretical Biology*. 1986, 123: 493-8
King, G.A.M. Recycling, reproduction, and life's origin. *BioSystems*. 1982, 15:89-97.

en relation. La question essentielle subsiste en effet, quant à la possibilité de formation spontanée d'un tel couplage.

Gánti, partant du fait que les nucléotides ont une structure base-ribose-phosphate, imagine bien une connexion à un système auto catalytique comportant du formaldéhyde élaborant le matériau brut via le composant ribose. Par ailleurs le cycle auto catalytique peut également être basé sur des sucres à base de phosphates. Gánti estime que ces trois sous-systèmes peuvent exister et être connectables dans le cas de membranes phospholipidiques.

Dans le détail, le schéma réactionnel pourrait être le suivant. Le ribose, un pentose, est synthétisé via la réaction de formose et est incorporé dans la chaîne du polycondensat de régulation sous forme d'acide ribonucléique attachant des nucléotides pour former l'alphabet moléculaire. Ainsi, la réaction de formose permettrait de produire les matériaux de base entrant dans les systèmes d'autoreproduction de l'unité de contrôle. De même, à partir d'un cycle mettant en jeu des composés du type sucre-phosphate, pourrait être créée la liaison fonctionnelle avec le sous-système membranaire.

Gánti proposait de valider le modèle du *chemoton* par un programme de recherche utilisant des molécules réelles à la place de la chimie abstraite du modèle. Il s'agissait, entre autres, de voir comment et sous quelles conditions il était possible de concevoir un chemin conduisant spontanément à la genèse de la vie. Par exemple, en partant de la réaction de formose, les étapes générales proposées étaient les suivantes :

L'aldéhyde formique constitue une des matières premières importantes de l'univers ; elle est produite par combinaison du méthane et de l'eau (radiation solaire) ; la réaction de formose se constitue en réseau auto catalytique, et présente donc les conditions stœchiométriques d'intégration comme sous-système d'un *chemoton* ; cette réaction de formose produit une grande variété de sucres dont le ribose, composant des acides nucléiques, ce qui rend possible le couplage du réseau auto catalytique de la réaction de formose avec celle de synthèse d'acide nucléique. Un autre intermédiaire de cette réaction est l'aldéhyde qui peut être transformée en glycérol, brique de base des membranes vivantes. Cela rend potentiellement le couplage stœchiométrique entre la réaction de formose et celle de formation de la membrane possible.

Néanmoins, en l'absence de mécanisme de couplage permettant de passer d'une

possibilité à sa réalisation, le problème de la nucléation du *chemoton* primitif reste entier. Et donc si un « avant » et un « après » *chemoton* peut à chaque fois faire l'objet d'approches progressives, de propositions de degrés d'avancement vers des critères partiellement satisfaits, la nucléation (hypothétique) reste toujours le marqueur d'un saut qualitatif notable. Saut qualitatif dont le mécanisme reste à imaginer comme un aboutissement de la formation spontanée des trois sous-systèmes constitutifs du vivant élémentaire par leur union. Demeure donc la question du processus, ou du mécanisme d'union de ces trois sous-systèmes. Cette union constitue une rupture dans une évolution progressive combinant hasard et nécessité, car au regard du modèle du *chemoton* c'est bien l'ensemble intégré, le super système qui seul est qualifiable de vivant et non chacune de ses parties prise isolément.

Notons que la formation de protocellules sans sous-système métabolique constitue une autre voie d'exploration. En l'absence de système métabolique il s'agirait alors d'hétérotrophes ultimes. Dans cette logique, Szostak et al. (2001) ont développé⁴⁰¹ un programme de recherche de synthèse de la vie passant par la formation d'une cellule élémentaire. Leur modèle physico chimique repose sur une membrane auto-catalytique en croissance et se divisant ainsi que sur deux ribozymes. Le premier est une réplique générale capable de répliquer et de synthétiser le deuxième type de ribozyme partie prenante de la synthèse lipidique. Ici le couplage entre molécules matrice et molécules de la membrane est de nature catalytique. Les matériaux de base sont pris dans le milieu : monomères pour les ribozymes, précurseurs lipidiques pour la membrane. Le système fonctionne sous certaines conditions. Est-il vivant ?

Le modèle du « *chemoton* » rencontre peut-être ici ses limites. Construit par abstraction du vivant actuel et visant l'unité élémentaire vivante, il procède globalement d'une démarche « top down », et bien qu'élaboré avec une chimie et des principes réalistes, il recourt à un artifice permettant de constituer la liaison nécessaire entre trois des fonctions majeures du vivant. De ce fait, il ne modélise qu'un vivant déjà constitué. Et l'exposé de la formation du *chemoton* à partir de trois sous-systèmes réunis en un super

⁴⁰¹ Szostak J.W., Bartel D.P., Luisi P.L., Synthesizing life. *Nature*, 2001, 409,387-90

système conduit dès lors à penser l'émergence de ces trois sous-systèmes de manière indépendante pour finalement se joindre de manière *ad hoc* et constituer l'unité vivante modélisée. Cette vue reste donc très problématique. L'évolution pré cellulaire aurait en effet pu aller aussi loin que l'apparition des ribozymes, avant même celle de la formation spontanée de systèmes de type *chemoton*.⁴⁰² Dans cette perspective, les *chemotons* primitifs devaient comporter des ribozymes dès le début de leur constitution.

- *Du chemoton primitif à la vie telle que nous la connaissons.*

A ce stade, on ne saurait encore parler du vivant de la biologie, car le système ne dispose pas des capacités de changements héréditaires reposant sur du matériel génétique. Pour ce faire, le sous-système d'information, le programme, doit être constitué de macromolécules à double brins disposant des propriétés permettant de diriger une polycondensation sur matrice en parallèle à leur processus de réplication. Ceci est d'ailleurs compatible avec l'idée qui semble faire consensus d'un matériel génétique formé à partir d'ARN et non plus d'ADN.

Le problème est que dans le contexte actuel, la formation d'ARN sur support de polymérisation dirigée se fait en recourant à des enzymes spécifiques. (ARN polymérase dans le cas de la traduction à partir d'ADN et ARN répliques à partir d'ARN). Qu'en est-il en l'absence d'enzymes ? Sans enzymes, pas de réplication à partir des monomères, mais l'ARN sous certaines conditions ne peut-il avoir des propriétés catalytiques ?⁴⁰³

Cependant, en partant de monomères d'autres types que les nucléotides triphosphates, la synthèse d'ARN par des molécules de polymérisation dirigées semble être réalisable. Il s'agit d'imidazolides qui peuvent d'ailleurs être formées dans les conditions rencontrées sur la terre primitive. Mais ainsi on ne fabrique que des brins courts à la place de la centaine ou plus de nucléotides nécessaires au codage d'un enzyme.

⁴⁰² Maynard Smith John, Szathmari Eörs, *The major transition in evolution*. Oxford University Press, 1995

⁴⁰³ Johnston W.K., Unrau P.J., Lawrence M.S., Glasner M.E., Bartel D.P., RNA-catalyzed RNA polymerization : accurate and general RNA-plated primer extension. *Science*, 2001, 292,1319-25
Strobel S.A. Repopulating the RNA world. *Nature*,2001, 411, 1003-6

Un autre problème est la séparation des doubles brins. Lorsque la chaîne est courte, cela est réalisé par agitation thermique. Il s'agit bien d'un problème majeur car on ne voit pas comment un tel système pourrait être constitué sans l'existence active d'enzymes. Par ailleurs, on arrive à synthétiser des composés de base sous diverses conditions abiotiques mais qui se révèlent finalement incompatibles et conduisent à la multiplication de réactions secondaires en formant des goudrons plutôt que les composés plus complexes d'intérêt biologique.⁴⁰⁴ Là également, le rôle des enzymes est primordial en accélérant différenciellement les réactions souhaitées, celles participant à l'organisation du système par rapport aux réactions secondaires non désirées. Wächterhäuser (1988,1992) tente d'ailleurs de résoudre ce problème en faisant intervenir la pyrite. Les intermédiaires du métabolisme sont dérivés d'un réseau en croissance dont les constituants sont liés à la pyrite.⁴⁰⁵ Cependant Orgel (2001) doute de la capacité d'une surface unique à catalyser des réactions si différentes. Il pense donc que l'apparition de molécules « gabarits » est première, molécules exhibant également des capacités enzymatiques. Ce sont ces molécules qui ont pu ensuite constituer un cycle métabolique.

Dans le premier cas, le *chemoton* serait une sorte de culmination d'une longue phase d'un métabolisme sur pyrite, alors que dans le deuxième il posséderait une activité « *template* » enzymatique dès sa constitution. Mais alors, contrairement aux affirmations de Gánti, un *chemoton* « non-enzymatique » n'aurait pu voir le jour. Cependant, quel que soit la nature de la régulation, le plan d'organisation général d'intégration du système relèvera de l'organisation type décrite par le modèle d'automate fluide, avec une activité enzymatique surimposée.

- *Compartmentation, évolution vers des systèmes plus complexes.*

La compartimentation joue un rôle vital en créant les conditions d'évolution vers des unités évolutives de plus haut niveau. Cette évolution est la résultante des variations dans la composition des polymères issus de la polycondensation sur gabarit. Elles peuvent également être générées stochastiquement durant la réplication et leur

⁴⁰⁴ Shapiro R., *Origins: A skeptic's guide to the creation of life on Earth*. Bantam Doubleday, New York, 1987.

⁴⁰⁵ Disulfure de fer de formule Fe₂S₂ pouvant contenir des traces de divers métaux.

réassortiment lors de la formation des descendants : soit par la variation de la longueur de ces macromolécules, soit par l'incorporation de monomères différents conduisant à la formation de séquences significatives facilitant la synthèse de molécules à propriétés catalytiques plus marquées.⁴⁰⁶ Ces mécanismes de sélection de groupe permettent alors de stabiliser ces populations de *chemoton* plus complexes.

La démarche pour penser l'émergence de la vie, au lieu de faire fond sur l'apparition première de molécules porteuses de sens, de séquences de monomères formant « texte », suivi ensuite de la formation de protéines hautement spécifiques, recourt pleinement aux propriétés de l'automate fluide en tant qu'unité intrinsèque. Elle vise à faire de l'apparition des systèmes vivants un processus nécessaire réglé par les lois de la chimie. Reste cependant à rendre compte de l'évolution vers les formes de vie actuelles qui disposent d'un « texte » génétique déterminant la nature des enzymes participant à son fonctionnement, à sa cohérence.

Selon Gánti, les propriétés héréditaires sont divisées en deux catégories : celles variables et modifiables à la base de l'évolution, de la diversité et de l'incroyable capacité d'ajustement du monde vivant ; celles immuables ou qui évoluent uniquement dans un cadre très restreint. Ces dernières constituent pour Gánti la vie *per se*, garantissant sa permanence, son unité, en dépit de la variabilité du vivant. Ces propriétés immuables sont portées par le mode d'organisation et de construction de l'ensemble du système vivant. Elles ne sont pas écrites sous formes de séquences monomériques (nucléotides) au sein des macromolécules formant le système génétique et ne sont donc pas abordées par la génétique moderne.⁴⁰⁷ Les propriétés changeantes sont étudiées par les généticiens, sont portées par les gènes (codés dans des séquences) et forment le programme génétique.⁴⁰⁸ Une version élémentaire de *chemoton* (pré biotique) fournit les données suivantes. Partant de l'hypothèse que ce système est organisé au sein d'une microsphère

⁴⁰⁶ Voir Maynard Smith J., Szathmary Eörs. *Major Transition in Evolution*. Déjà cité.

⁴⁰⁷ A nuancer car l'approche épigénétique étudie la manière dont certaines propriétés héréditaires modifiables reposent sur le mode d'organisation de la construction plutôt que dans les séquences monomériques ...

⁴⁰⁸ Nous exposons ici l'analyse de l'auteur du *chemoton*, fortement marquée par les métaphores issues des sciences de l'information.

de 1 μm de diamètre, il faudrait de l'ordre de 10 millions de molécules pour former la membrane ainsi que 10 millions de nucléotides constituant par polycondensation 100 000 brins d'ARN formés d'une centaine de nucléotides. Ces brins étant appariés statistiquement (50 000 doubles brins), on peut concevoir que leurs descendants ne possèdent pas le même nombre de molécules d'ARN. Cela conduit à une distribution en taille des brins dépendant de la quantité d'ARN et induit en conséquence une forme de diversité génétique. Cette quantité variable modifie également les cinétiques des réactions chimiques qui se déroulent au sein de la microsphère. De plus, le stock d'ARN détermine via les variations de la quantité de molécules, de la taille des brins, de la proportion relative de ses quatre nucléotides, d'autres propriétés héréditaires. Et lorsque le nombre et la composition ou la longueur de la matrice de polymérisation varie, les demandes en matériaux bruts sont modifiées et induisent des changements dans les relations quantitatives du système métabolique auto catalytique qui les produit. A ce stade, bien que la polymérisation dirigée sur matrice présente des défauts de réplication, les différences de composition en séquence des brins produits ne jouent pas encore de rôle majeur dans les performances d'ensemble du *chemoton*.

Dans le monde des vivants contemporains il en va autrement car toutes les réactions s'y déroulent en présence d'enzymes dont la synthèse est sous contrôle des séquences d'acides nucléiques du matériau génétique. Dès lors, il convient d'imaginer un processus qui puisse passer d'une régulation par la quantité à une régulation mettant en jeu l'arrangement des séquences. Partant donc d'une forme de vivant réduit à sa plus simple expression modélisée par un *chemoton* primitif, un processus d'évolution lui fera progressivement acquérir un système de régulation fondé sur les propriétés d'ARN qui se répliquent, à la fois catalyseur et porteur d'une structure d'information signifiante. On passe alors d'une régulation quantitative, simple, la concentration de monomère qui dissocie les brins de polymères, à une régulation plus complexe faisant intervenir des capacités enzymatiques. Cette structure enzymatique reste seconde par rapport à l'organisation de base du *chemoton*, à la caractérisation de la vie, et est quelque chose qui dans la démarche de Gánti, se rajoute progressivement au cours de l'évolution, comme un accident rendant compte des potentialités de diversification de la structure de base du vivant.

Les brins d'ARN de ce *chemoton* primitif auraient donc une longueur moyenne d'une centaine de nucléotides, seraient organisés en double hélice et formés à partir des

quatre types de nucléotides (A, G, C, U)⁴⁰⁹ appariés selon les règles bien connus d'appariements (A avec U etc...). Dans un premier temps, l'assemblage aurait été le fruit d'un hasard contraint par la chimie favorisant tel ou tel assemblage. En exploitant le mécanisme de régulation primitif, Gánti élabore alors tout un processus conduisant à l'enrichissement en fonctionnalités. Ainsi, lorsque la concentration de nucléotides atteint un seuil donné, les brins d'ARN se scindent, perdent leur rigidité et deviennent mobiles en raison des agitations moléculaires. A partir de cette agitation se créeraient des liens covalents conduisant à la formation de boucles d'ARN en condition abiotique. Ces boucles, dès lors, peuvent s'associer et les ARN exhiber des structures spatiales. Celles-ci dans un premier temps ne seraient pas encore fonctionnelles, mais pourraient acquérir à travers un processus de couplage une structure proche des actuels ARN de transfert. Disposant d'une organisation spatiale, de sites actifs déterminés par la séquence nucléotidique, ces ARN peuvent alors jouer le rôle de catalyseurs primitifs favorisant le couplage de petites molécules ou la coupure de structures plus grandes : l'ARN fonctionne alors comme un ribozyme.⁴¹⁰C'est à travers ces structures en boucles que les séquences formées au hasard acquièrent alors de l'information rendant possible l'apparition de fonctions génétiques et enzymatiques plus complexes.

Le développement génétique suit le même mécanisme. Lorsque qu'un ARN enzyme se réplique, la double structure est brisée et livre deux brins. Dans le même temps, sa structure spatiale se délite et le brin non replié ne manifeste plus d'activité enzymatique. Par contre, il fonctionnera comme brin d'ARN neuf, permettant l'appariement par polycondensation. La séquence de nucléotides sera donc directement déterminée par celle du brin d'origine et sera son complément. Le brin positif qui exhibait des propriétés catalytiques et le brin négatif auront la même structure mais ce dernier ne disposera pas de la même propriété enzymatique (là où il y avait un A il y a maintenant un U par exemple). Le brin négatif a de facto la fonction de gène car il permet de construire un ARN enzymatique (e-ARN). Ce mécanisme de réplication se réalise cependant avec un

⁴⁰⁹ A pour adénine, G pour guanine, C pour cytosine, U pour uracile, du nom de quatre des bases azotées entrant dans la composition de l'ARN.

⁴¹⁰ On retrouve ici l'essentiel des travaux d'Altman et Cech.

taux d'erreur important conduisant à la formation d'ARN mutants. En raison de vitesses de mutation élevées la probabilité d'apparition d'enzymes plus performants est assez forte (Nota, cela limite aussi la taille du génome : Eigen 1971). Et alors pour Gánti, il apparaît presque nécessaire que se forment des structures (ADN) capables de retenir l'information de façon plus stable. Finalement ce *chemoton* dont l'information est portée par l'ADN formera la cellule actuelle.

L'ensemble du scénario développé par Gánti, résumé et simplifié ici, repose finalement sur des enchaînements nomologiques qui à partir de *chemotons* primitif permettent de modéliser les étapes successives de l'histoire du vivant. L'accent et la place conféré à une chimie spéciale autour des réactions de polycondensations, de réplifications accentue l'aspect nécessaire, résultant des lois de la chimie organique, de la biochimie. La contingence intervient néanmoins à deux niveaux distincts mais complémentaires. C'est, d'une part, l'infidélité des mécanismes de réplifications qui induit un aléa dans la formation de *chemotons* disposant de propriétés et caractéristiques différentes, et d'autre part les variations aléatoires au sein de l'environnement de ces systèmes sur les plans énergétiques, de l'apport de nutriments, des concentrations etc. qui favorisent la stabilisation relative (et dans ce cas nécessairement dynamique) des *chemotons* les plus adaptés.

Tout se passe comme si un motif fixe pouvait être décliné dans une variété circonscrite de possibles, explorés aléatoirement et triés selon des critères d'efficacité résultant de la physico chimie locale procédant de l'environnement du système.

3.3 Autour des hyper cycles, le modèle d'une organisation matérielle nécessairement évolutive

Ce qui frappe à la lecture attentive des quelques 150 pages parues dans la revue *Naturwissenschaften* entre 1971 et 1978^{411,412,413, 414} c'est la qualité d'un art, celui exercé par le modélisateur pour concevoir et réaliser une intrication étroite entre un formalisme mathématique et les données empiriques proposées par les différentes disciplines des sciences de la vie.

Et cet art est mis au service d'une interrogation clairement posée dès la première publication de 1971. Comment peut-on sortir du dilemme suivant : un code génétique performant nécessite des enzymes pour en catalyser la synthèse, mais pour disposer de ces enzymes il faut au préalable mettre en œuvre un code génétique performant ?

Nous savons depuis les premiers travaux de biologie moléculaire que les protéines et notamment les enzymes qui assurent toute une gamme d'activités catalytiques au sein des organismes vivants, résultent de la traduction de parties significantes d'ADN. Ce polymère est formé d'une succession de nucléotides composant des séquences codantes, et cet ADN (ainsi que l'ARN, de nature chimique voisine qui sert de médiateur – messenger, transfère, synthèse- dans le réseau complexe conduisant à la synthèse des différents composés moléculaires au sein des cellules) a besoin de ces enzymes, d'une part pour être synthétisé et d'autre part pour réguler et organiser l'expression même du code formé par la succession significative des nucléotides qui le composent. De ce constat, que l'analyse détaillée de la chimie des cellules bactériennes nourrit et conforte, découle une interrogation pour celui qui se penche sur l'origine de ce mécanisme : qu'est ce qui est

⁴¹¹ Eigen M., Selforganization of Matter and the Evolution of Biological Macromolecules. *Die Naturwissenschaften*. 1971, 58 : 465-523

⁴¹² Eigen M., Schuster P., The Hypercycle. A principle of natural self-organization. Part A : Emergence of the Hypercycle. *Die Naturwissenschaften* . 1977,64 : 541-565

⁴¹³ Eigen M., Schuster P.,The Hypercycle. A principle of natural self-organization. Part B : The abstract Hypercycle. *Die Naturwissenschaften*.1978, 65 : 7-41

⁴¹⁴ Eigen M., Schuster P.,The Hypercycle. A principle of natural self-organization. Part C : The realistic Hypercycle. *Die Naturwissenschaften*. 1978, 65 : 341-369

premier dans le processus d'émergence de la vie, la protéine (polypeptides), support des multiples fonctions du vivant ou l'acide nucléique support de l'information qui en dirige la synthèse ? Et alors, selon la réponse donnée, comment la rencontre essentielle qui unit dans une relation de coopération réciproque, protéines enzymatiques et chaînes d'acides nucléiques se serait-elle effectuée? Comment finalement expliquer la nucléation d'un système organisé ?

Le dilemme n'est peut-être qu'apparent, résultant d'une interrogation formulée à partir des seuls éléments qui constituent l'ensemble et non à partir du tout qui leur assigne leur rôle. La recherche d'une chaîne causale de causes et d'effets élémentaires se déployant au sein d'une succession temporelle, entre fonction (assurée par les protéines) et information (portée par les acides nucléiques) peut masquer une solution à la question posée ; celle qui résiderait plutôt dans la recherche des conditions qui auraient pu conduire à la formation d'emblée d'un ensemble inter relié de macromolécules agissant en synergie pour assurer et les fonctions « phénotypiques » et les fonctions « génotypiques ».

C'est l'approche conduite par Eigen et ses collaborateurs. Elle vise à dépasser le dilemme du jeu réciproque entre cause et effet, en développant une théorie de l'auto organisation liant en une boucle d'action et de rétroaction au sein d'un système, les deux composantes fonctionnelles et informationnelles. Ce qu'il s'agit d'établir, ce sont les conditions qui autorisent l'installation d'un tel jeu de réciprocité entre causes et effets dans une organisation fonctionnelle macroscopique incluant d'abord l'autoréplication d'unités similaires puis ensuite une auto reproduction de toute l'organisation. Celle-ci disposerait alors de la capacité d'évoluer lui permettant de s'engager dans le chemin évolutif conduisant à la vie telle que nous la connaissons.

Le travail de modélisation associe étroitement développements mathématiques, liés aux théories des systèmes dynamiques non linéaires, à celles de l'information développées par Von Neumann, Wiener et Shannon avec les connaissances issues de différents champs des sciences empiriques : biologie moléculaire, catalyse enzymatique, catalyse en milieu hétérogène, thermodynamique, chimie organique, chimie pré biotique des années 1970. Le modèle développé sert alors d'intermédiation entre ces différentes disciplines empiriques et les sciences formelles au profit d'une démarche heuristique, et explicative. En effet, la construction, l'élaboration du modèle fondent le choix entre scénarios et par ailleurs, son exploitation, tenant compte des hypothèses les plus vraisemblables de la chimie pré biotique, livre un enchaînement d'étapes expliquant le

passage de l'inorganisé à l'organisé, du chimique au biologique.

3.3.1 Deux niveaux de modélisation : du cycle auto catalytique à l'hypercycle

- *Catalyse et cycles catalytiques : application à des unités auto-répliquatives.*

Le concept de porteurs d'informations apparaît central dans tout le dispositif d'analyse et d'exploitation du modèle formel développé par Eigen et ses collaborateurs. Il s'applique au départ à des unités organiques élémentaires (nucléotides par exemple) qui, assemblées, forment une classe de macromolécules partageant les mêmes caractéristiques « métaboliques » (mode d'assemblage), de réplication (copie), de mutation (variabilité et filiation) et ce, pour des concentrations suffisamment élevées pour que l'on puisse traiter l'ensemble d'un point de vue macroscopique. Il s'agit alors de composés qui ne résulteraient pas du simple jeu du hasard des rencontres mais qui seraient fruit de principes physico-chimiques qui en détermineraient l'association et l'insertion au sein du cycle. Par-là, on exprime dès l'origine même d'un processus qui conduirait au vivant, le rôle signifiant de certaines séquences d'assemblages polymériques qui, émergeant d'un processus de sélection, seront conduites à jouer un rôle éminent dans l'évolution ultérieure.

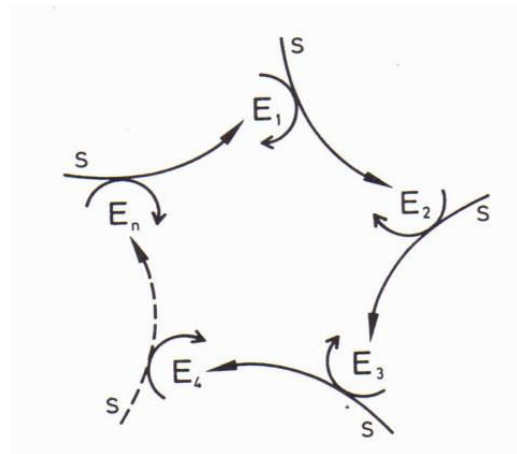
On ne fait par-là, qu'abstraire sur le plan de la description d'une structure ordonnée le résultat d'une propriété des acides nucléiques à se répliquer sur la base d'attractions électro faibles, spécifiques, entre les bases formant la structure différenciant les divers acides nucléiques. Ces unités moléculaires différenciées qui, assemblées, conduisent à des séquences ordonnées de nucléotides, peuvent alors être interprétées comme formant des « mots » composés à partir d'un alphabet élémentaire formé des quatre bases entrant dans la composition de l'ARN.

Mais cette réplication auto catalysée, en raison même de l'absence de catalyseur enzymatique spécifique (de type réplicase), reposant donc sur les capacités intrinsèques de l'entité répliquative, n'est pas fidèle et conduit à la formation de copies contenant des erreurs de réplication.

Ce que l'on représente donc ce sont les propriétés d'un système organisé autour de

la réplication avec erreurs de porteurs d'informations, mettant en jeu des propriétés catalytiques intrinsèques favorisant la réplication d'un composé similaire. Les porteurs d'informations sont donc intégrés dans un cycle réactionnel dans lequel ils jouent deux rôles : ils s'auto-répliquent et ils catalysent la synthèse d'un autre porteur d'information à partir d'un substrat commun. Le premier temps de la démarche modélisatrice décrit et prévoit les comportements d'un tel système à travers l'évolution des concentrations des différentes composantes parties prenantes au cycle auto-catalytique.

Le schéma ci-dessous, graphe des relations entre n entités E décrit l'objet de la démarche modélisatrice. Chaque E_i catalyse la synthèse de son $i+1$ à partir du substrat s . L'ordre des réactions détermine l'ordre dans le cycle. Par construction, la dernière entité catalyse la formation de la première.



Cycle autocatalytique : graphe des relations

C'est donc toute une population d'espèces moléculaires liées qui se constituera et évoluera dans le temps sous contraintes propres aux réactions de synthèse et de décomposition de chaque entité moléculaire.

- ***Auto-organisation de la matière à partir d'unités auto-répliquatives : phénoménologie.***

- *Les prérequis.*

On représente les réactions de formation et de dégradation d'espèces moléculaires

en partant des paramètres thermodynamiques chimiques classiques, les affinités positives entre composés, ceux d'un substrat composé d'éléments énergétiquement riches (par exemple à l'image de l'ATP) et ceux des espèces engagées dans le cycle. Ce sont ces données thermodynamiques générales qui fournissent les conditions de possibilités de la transformation d'une rencontre aléatoire entre molécules individuelles en produits plus ou moins stables, les propriétés catalytiques agissants pour accélérer, faciliter cette transformation en abaissant le seuil d'activation nécessaire à la formation d'une liaison. Ces propriétés ont pour conséquence d'augmenter la probabilité de succès des réactions de formation, et de déplacer l'équilibre réactionnel de formation-décomposition en faveur de la formation du produit de synthèse.

Mais ici, dans le modèle qui ambitionne de livrer les conditions de possibilité d'émergence de formes organisées de la matière, ce qu'on recherchera, ce ne seront plus les conditions d'équilibre comme en chimie classique, celles qui épuiserait toutes les possibilités d'évolution d'un système de réactifs dans lequel décomposition et formation seraient macroscopiquement stabilisées, mais une situation nouvelle dans laquelle l'apport constant d'un flux de réactifs élémentaires énergétiquement riches permet de penser la formation d'un état stationnaire loin de l'équilibre. Cet état stationnaire, hors équilibre réactionnel, est décrit par la thermodynamique des structures dissipatives⁴¹⁵ étudiée par Prigogine. Ce sont les conditions de réalisation d'une organisation supra moléculaire.

Il s'agit en somme d'un métabolisme réduit à sa plus simple expression. L'alimentation continue en réactifs d'un système de composés chimiques constitue un système utilisant la matière et l'énergie libre qui lui est fourni. Les réactions de synthèses conduisent alors à la diminution de l'énergie libre du système, compensée par une augmentation de l'entropie de l'univers. La démarche est à rapprocher de la propriété essentielle du vivant telle qu'identifiée par E Schrödinger dans « Qu'est-ce que la vie ? » : « la matière vivante évite la décomposition vers l'équilibre ».⁴¹⁶

⁴¹⁵ Prigogine Illya, *Etude thermodynamique des processus irréversibles*. Liège : Desoer, 1947

⁴¹⁶ Schroedinger Erwin, *Qu'est-ce que la vie ? De la physique à la biologie*. Paragraphe 57. Christian Bourgeois

- *Description qualitative du modèle*

Le modèle repose donc sur les propriétés de structures moléculaires particulières, oligomères ou polymères, d'autorépliations dirigeant leur propre formation. Ces réactions d'autorépliations constituent l'une des conditions nécessaires à la mise en route d'un mécanisme de sélection qui puisse fonder une dynamique d'évolution. En effet, l'autoréplication en raison des erreurs possibles de copie conduit à la formation de mutants, c'est-à-dire à des formes légèrement différentes des structures moléculaires initiales servant de patron, par l'incorporation aléatoire d'un élément non strictement conforme aux éléments originaux formant la copie de référence initiale. Ces mutants peuvent alors se révéler plus avantageux dans la mesure où ils manifesteraient un meilleur potentiel de stabilisation au sein du système auto-réplicatif.

La fidélité du processus d'autoréplication est réduite par l'agitation thermique perturbant les conditions même de la réplication. Dès lors, la cinétique descriptive de cette réplication prendra en compte deux facteurs contraires. La vitesse de réplication est directement liée à la différence entre l'énergie d'activation nécessaire à la formation de l'assemblage des unités élémentaires dans le cycle et l'énergie environnante caractérisée par une agitation thermique d'autant plus forte que la température est élevée. Plus cette différence est faible et plus la cinétique de réplication est élevée, mais plus alors elle conduit à accroître la probabilité de réplication avec erreur. Il est d'ailleurs compréhensible, qu'en l'absence de catalyseurs hautement spécifiques, sur le modèle des enzymes de type réplacase, vitesse et fidélité concourent en sens inverse à la croissance de ces structures moléculaires auto-répliquatives.

Ce sont donc les erreurs de réplication qui sont à l'origine de la différenciation. L'analyse du jeu opposé entre vitesse et fidélité de réplication au sein d'un système livré au jeu des réactions auto-catalysées d'une seule classe d'entités moléculaires conduira à l'identification (dans le cadre du modèle formel) d'un seuil au-delà duquel l'évolution (c'est-à-dire la réplication avec erreur) accélérée mènera nécessairement à la disparition du

système auto-répliatif. (Ou exprimé dans le cadre de la théorie de l'information à la perte de l'information accumulée dans le cycle.)

L'ensemble ainsi caractérisé par l'insertion dans un cycle constitué autour de conditions de catalyse mutuelle d'un assemblage de monomères pré-biotiques formant des polymères dotés de capacités auto-répliatives, est ce qui est qualifié de système darwinien par Eigen.

- *Le système darwinien formel : coopération et sélection.*

L'expression mathématisée la plus simple des relations régissant la cinétique auto-catalysée de répliation et de formation des différents composés est la suivante :

$$\frac{dx_i}{dt} = (A_i Q_i - D_i) x_i + \sum_{k \neq i} w_{ik} x_k - \Phi_i$$

Cette expression décrit et organise la relation entre la vitesse de répliation et de formation d'une espèce moléculaire « i », en fonction de sa concentration x_i , de celle de ses mutants x_k et d'un paramètre composite Φ_i de flux décrivant l'apport constant de matériaux élémentaires énergétiquement riches et leur sortie du système lorsqu'ils ne sont pas consommés. C'est la conséquence en termes de concentration en réactifs, du principe d'état stationnaire du système.

L'indice « i » réfère à toutes les espèces moléculaires auto-répliatives caractérisées par une même structure d'assemblage (identifié à une information génétique).

$A_i Q_i x_i$ décrit la cinétique de formation spontanée de l'espèce « i » en raison des affinités positives de ses constituants. Le terme A_i est propre à la stœchiométrie de formation de « i » à partir des matériaux élémentaires (monomères riches en énergie).

$D_i x_i$, à l'inverse, décrit celle de sa décomposition. D_i dépend linéairement de la concentration en « i ».

Q_i est un facteur, dont la valeur comprise entre 0 et 1, traduit la qualité de la reproduction et représente la fraction de copie fidèle à « i ».

La concentration de copies non fidèles est alors $A_i(1-Q_i)x_i$. La cinétique de ces

copies non-conformes, « k », est de la même forme que celle de l'espèce « i », avec des coefficients propres. Notons que dans l'équation cinétique de l'espèce « i », le terme en $+\sum_{k \neq i} w_{ik} x_k$ traduit la contribution au sein du cycle auto-catalytique de chaque espèce mutante « k » à la formation de « i ». Les membres de la même famille contribuent ainsi à la synthèse de chaque « parent », w_{ik} étant le paramètre individuel de mutation d'une espèce « i » en une espèce « k ». Ce paramètre est généralement faible comparé au paramètre de réplique $A_i Q_i$ et ce d'autant plus que la « distance » entre le « parent » « k » et « i » est élevé. On en déduit la relation de conservation entre espèces d'une même famille :

L'hypothèse de constance des flux permet de simplifier les équations précédentes tout en se rapprochant de conditions réalistes (C.à.d. expérimentales). Cette condition peut en effet être décrite par la constance des flux de réactifs. Sous cette condition, le « turnover » métabolique, celui qui produit les espèces « i » au moyen d'une polymérisation aléatoire de matériaux élémentaires (monomères riches en énergie) permet alors de simplifier le paramètre de flux Φ_i :

$$\Phi_i = \Phi_{\text{total}} * x_i / \sum_k x_k \text{ avec } \sum_k x_k = \text{constant}$$

Cela implique la régulation constante du flux global afin de compenser l'excédent de production, et alors le flux total peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\Phi_t = \sum_k (A_k - D_k) x_k \equiv \sum_k E_k x_k$$

On met ainsi en évidence un concept nouveau, celui d'excédent de productivité de l'espèce « i » : $E_i \equiv A_i - D_i$ ainsi que celui d'excédent de productivité moyen du système :

$$\bar{E}(t) = \frac{\sum_k E_k x_k}{\sum_k x_k}$$

L'équation cinétique originelle peut être simplifiée et conduit à une expression incorporant les paramètres fondamentaux du système darwinien.

$$\frac{dx_i}{dt} = [W_{ii} - \bar{E}(t)] x_i + \sum_{k \neq i} w_{ik} x_k$$

Dans laquelle le paramètre $W_{ii} = A_i Q_i - D_i$ représente la valeur sélective de

l'espèce « i » et $\bar{E}(t)$ celle de la productivité moyenne de l'ensemble. On exprime ainsi, dès l'origine du processus, le rôle éminent attribué à certaines séquences d'assemblages polymériques qui, émergeant d'un processus de sélection, joueront un rôle significatif dans l'évolution ultérieure. Le paramètre $\bar{E}(t)$ dépend du temps et conduira à manipuler des équations différentielles non linéaires dont il faudra étudier les conditions de stabilités (attracteurs).

- *Des espèces vers les « quasi-espèces » : de l'isolement à la coopération.*

L'interprétation des équations précédentes en termes de couplage réactionnel met en jeu des processus de coopérations, mutations, compétitions.

Compétition, celle entre espèces moléculaires du cycle, mutations résultantes d'erreurs de reproduction de chaque espèce individuelle « i », coopération catalytique entre espèces proches, celles dont les facteurs w_{ik} et w_{ki} ont une valeur suffisamment significative pour peser dans la formation de l'espèce « i ». Cette phénoménologie, qui résulte de la forme imposée aux rapports entre les éléments entrant dans des réactions de formation, ouvre la voie à une reformulation des équations et à la réinterprétation conceptuelle de ces interrelations faites de dépendance et de compétition.

Le concept de « quasi-espèce » traduit sur les plans mathématiques et réels cette nouvelle voie d'interprétation. Une quasi espèce « j » est formée de la combinaison linéaire de différentes espèces « k » selon un rapport déterminé par l'intensité de leur liaison au sein du cycle. Les caractéristiques de cette quasi espèce sont déterminées par la relation :

$$\frac{dy_i}{dt} = [\lambda_i - \bar{E}(t)]y_i \quad \bar{E}(t) = \frac{\sum_k \lambda_k y_k}{\sum_k y_k}$$

Sur le plan mathématique cette relation résulte d'une transformation affine des coordonnées des équations différentielles précédentes. Elle met en évidence une des propriétés essentielles des cycles catalytiques constitués de quasi espèces caractérisées par la concentration de leur population y_i et le paramètre λ_i . Sur le plan formel, ce paramètre est une des valeurs propres positives du vecteur propre qui corrèle W_{ii} (valeur sélective) et w_{ik} (facteurs de couplage des espèces individuelles i et k). Il introduit un seuil qui induit un effet sélectif marqué. En effet, toutes les quasi-espèces dont la valeur du paramètre λ_i est au-dessus du seuil $\bar{E}(t)$ vont croître, alors que celles dont la valeur est inférieure vont

disparaître.

De plus $\bar{E}(t)$, l'excès de productivité moyenne, fonction croissante du temps, élève continûment le niveau même du seuil limite de sélection. Ce qu'on décrit alors, c'est un mécanisme d'élimination progressif, rejetant régulièrement les quasi-espèces dont le paramètre λ en raison de sa faible valeur, passe en dessous de celle d' $\bar{E}(t)$, pour ne retenir au final que les cycles auto catalytiques à valeur élevées de λ autorisant la stabilisation d'une seule quasi-espèce fruit de cette convergence vers un état stationnaire défini par la relation : $\bar{E}(t) = \lambda_{\max}$

Le principe de sélection darwinien, la *fitness*, est réduit ici à l'expression d'un optimum ou extremum mathématique, celui que peut atteindre une combinaison linéaire déterminée d'espèces moléculaires en équilibre au sein d'un cycle auto-catalytique.

La quasi-espèce peut donc, sous ce point de vue, être décrite comme une distribution de molécules participant d'une même lignée reproductrice et dont la survie résulte de propriétés intrinsèques (celles de leur cinétique répliquative). Ce qui est intéressant alors, c'est l'interprétation empirique fournie par la transposition sur le plan de la chimie, des caractères qui définissent une espèce biologique. A l'instar d'une telle espèce dont on caractériserait l'appartenance par la proximité structurale de l'ADN des individus, proximité autorisant néanmoins des variations phénotypiques autour d'un type de référence, ce sont ici les quasi-espèces sélectionnées en raison de leur stabilité qui manifestent des propriétés phénotypiques collectives : vitesse de répllication, durée de vie, taux d'erreur etc. qui s'organisent autour d'une espèce moléculaire type, structure répliquative de référence.⁴¹⁷

⁴¹⁷ On retrouve ici, le principe de « stabilisation chimique » de systèmes répliquatifs à l'image des brins positifs et négatifs d'ARN par voie dynamique tel que présenté par le chimiste Addy Pross. Dans ces systèmes répliquatifs c'est la population de « répliqueurs » qui est stable et non le « répliqueur » individuel qui se transforme continûment. La stabilisation est alors réalisée par l'équilibre au sein de la population d'entités qui disparaissent compensées par celles qui se développent. L'approche globale nourrit le concept de *dynamic kinetic stability* (DKS) au cœur de la conception des systèmes vivants chez l'auteur de : *What is Life. How chemistry Becomes Biology*. Oxford University Press, 2012

La distribution au sein de la quasi-espèce est alors caractérisée par un type originel qui au sein de la population d'espèces chimiques liées par les réactions cycliques représente l'espèce moléculaire ayant la valeur sélective la plus élevée.

$$W_{ii} = A_i Q_i - D_i$$

Cette distribution d'espèces définit la capacité d'adaptation et d'évolution de la quasi espèce. C'est en effet le rapport entre l'espèce type originel de référence et les espèces de la même filiation qui détermine la capacité évolutive d'un ensemble au sein du cycle auto-catalytique. Ainsi une faible concentration relative de l'espèce type originel de référence (« *wild type* ») par rapport aux espèces filles favorisera évolutions et adaptations ultérieures.

On ébauche alors une dynamique d'évolution qui fera intervenir des mutants « neutres », sans différentiels de valeur sélective, ne modifiant pas le comportement du cycle catalytique et des mutants apportant une valeur sélective plus forte conduisant soit à une modification avantageuse soit à une instabilité pouvant mener à la disparition.

- *Quasi espèce : liens entre quantité d'informations et stabilité.*

Ce concept, met en exergue une autre caractéristique des systèmes auto-réplicatifs : la quantité d'information contenue dans la quasi espèce. Ici, dans le droit fil des conceptions qui confèrent à l'ADN (ou l'ARN) le rôle de support de l'information génétique (comme métaphore d'un programme informatique instruisant le déroulement d'opérations), la question centrale sera celle de la quantité d'information maximale que pourrait stocker la quasi-espèce. Dans l'approche informationnelle du rôle du code génétique, cette quantité conditionnerait en effet les possibilités d'évolution d'un système lui permettant d'intégrer de nouvelles activités fonctionnelles comme par exemple celles de traduction d'une partie significative d'ADN en protéines.

Dans le mécanisme mis en place par Eigen et ses collaborateurs, l'information résulte de l'application du filtre sélectif décrit précédemment qui transforme les assemblages au hasard d'unités monomériques en entités porteuses d'informations. Les molécules acquièrent une valeur à travers le processus de sélection. Il s'agit dans ce qui est mobilisé par Eigen, de la poursuite de la métaphore de l'alphabet formé par des nucléotides entrant dans la formation de l'ADN. Cet alphabet à quatre lettres correspond aux différenciations apportées aux nucléotides par la variation de leurs bases (Dans

l'ARN, la thymine du nucléotide intervenant dans l'ADN étant remplacée par l'uracile). Dans cet ordre d'idée, un poly-nucléotide est alors organisé en mots correspondants à des séquences significantes de cet alphabet à quatre lettres. Ce qui les rend significatif dans le modèle développé, c'est la valeur sélective du poly-nucléotide. Intervient donc, dans le droit fil de la démarche modélisatrice, la qualité de la réplication qui résulte sur le plan moléculaire de la probabilité unitaire de reproduction fidèle des éléments de l'alphabet. La valeur de ce paramètre est déterminée par les propriétés concrètes du nucléotide, de ses potentialités d'appariement avec ses homologues (Ainsi la cytosine s'apparie naturellement plus aisément à la guanine et la thymine à l'adénine).

Au niveau global, et non plus de celui de chaque molécule, les conditions de stabilité du système sont donc également celles de la conservation de la quantité d'information. On montre, à partir des valeurs atteintes en stabilisation dynamique, que le nombre de symboles moléculaires (les mots du programme) d'une espèce moléculaire auto-réplicable est inversement proportionnelle au taux d'erreur moyen de réplication des nucléotides élémentaires incorporés dans l'espèce soit :

$$N = \frac{\log s}{(1 - q)}$$

Dans cette relation, « s » est interprété comme étant le facteur de supériorité de la séquence originelle sur les séquences dérivées. (La valeur de « s » est supérieure à un) Et « N » est le nombre maximal d'unités ou nucléotides élémentaires d'une espèce auto-réplicable au sein du cycle.

S'agissant d'une valeur limite établie au cours d'un processus dynamique, cette relation peut être interprétée dans un autre sens, comme celui d'un seuil qui fixerait une limite au processus évolutionnaire du système, au-delà duquel l'information accumulée serait perdue suite à une erreur catastrophique, c'est-à-dire par l'introduction dans le cycle d'un mutant dont le taux d'erreur de réplication serait trop élevé et conduirait à sa disparition. La quantité d'information maximale contenue dans un cycle est directement

corrélée à sa stabilité, elle signe également un mur évolutif infranchissable.

Ces données issues de l'exploitation du modèle théorique ont été confrontées à un modèle expérimental⁴¹⁸ issu d'un virus à ARN, le phage Q β . L'étude de la réplication in vitro de son ARN a permis de valider la relation définissant le contenu maximal d'information, exprimé sur le plan moléculaire par la taille maximale de l'ARN de ce phage. Notons cependant que le modèle expérimental mobilise une catalyse enzymatique (réplicase) qui autorise une qualité de réplication de 0.9995. Dans ces conditions les longueurs de chaînes d'ARN atteignent environ 4500 nucléotides. Un prolongement de l'étude avec de l'ADN cette fois ci, a également été réalisé. La qualité de réplication est cette fois ci de plusieurs ordres de grandeurs supérieures, pour atteindre des valeurs de 0.999999 autorisant alors des longueurs de chaîne de 1 à 10 millions de nucléotides (cas des procaryotes de type E. Coli). Mais là également, ces qualités ne sont atteintes que grâce à des répliques, des protéines jouant un rôle de catalyse hautement spécifique.

En l'absence de réplique, le taux de réplication est très notablement plus faible et dès lors limite drastiquement la longueur des chaînes. Les estimations conduites par Eigen et Schuster donnent les indications suivantes : pour une valeur de la qualité de réplication de 0.99, les chaînes constituant les espèces moléculaires d'un cycle auto-catalytique ne peuvent dépasser une longueur comprise entre 50 à 100 nucléotides (Il est noté par les auteurs que cette longueur est proche de celle rencontrée dans les ARN de transfert).

La capacité évolutive d'une première forme d'organisation de la matière, modélisée sous forme de cycle auto-catalytique élémentaire est dès lors limitée. Ce qu'il s'agit maintenant d'examiner, c'est la manière de pouvoir combler cet espace de prime abord infranchissable, celui qui séparerait les premières unités auto-répliquatives à faible contenu d'information et les organismes vivants possédant de longues chaînes de nucléotides, ARN et ADN, dont les longueurs, chez les vivants les plus simples (procaryotes) permettent de mettre en œuvre des mécanismes et des fonctions déjà

⁴¹⁸ Levisohn R., Spiegelman S., Further Extracellular Darwinian Experiments with Replicating RNA Molecules: Diverse Variants Isolated under Different Selective Conditions. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, 1969,63: 80

fortement spécifiques et raffinées.

- ***Du cycle catalytique vers l'hyper cycle, un nouveau niveau d'organisation permettant de dépasser le paradoxe d'Eigen : pas de grand génome sans protéines, pas de protéines sans grand génome.***

Le scénario précédent, fondé sur l'apparition de molécules pré biotiques élémentaires et leur auto assemblage au sein d'un cycle auto-catalytique simple se heurte donc à une limite, le seuil d'erreur catastrophique (de réplication).

Certes, le modèle formel confronté aux données empiriques⁴¹⁹ disponibles permet d'élaborer un scénario de démarrage, de nucléation d'une première forme d'auto organisation stabilisée autour d'une structure génétique élémentaire, sans catalyse enzymatique, sans protéines jouant des rôles fonctionnels évolués.

Mais ce sont également ces considérations empiriques mettant en valeur le rôle éminent des enzymes et celles issues de l'analyse du modèle d'auto catalyse simple qui militent pour l'enrichissement du modèle initial afin qu'il puisse intégrer plusieurs unités auto répliquatives au sein d'un système de coopération qui les stabiliserait. L'hyper cycle constitue la réponse aux limites de ces cycles simples. Il correspond à une nouvelle forme d'organisation de la matière vivante, d'un nouveau niveau d'organisation.

Ce qui est montré, c'est que l'intégration des molécules auto-répliquatives dans un système de coopération plus vaste, est une condition nécessaire pour pouvoir aller vers un processus d'évolution moléculaire permettant de s'affranchir du paradoxe d'Eigen. Cette intégration coopérative est modélisée par l'hypercycle. L'augmentation de la quantité d'information dans un système coopératif est une des conditions de possibilité de son enrichissement fonctionnel ultérieur. Mais augmenter cette quantité d'informations impose une amélioration de la qualité de la réplication des porteurs d'informations par l'intervention de répliques, par exemple de chaînes polypeptidiques à propriétés spécifiques.

⁴¹⁹ Miller, S.L., Orgel, L.E. *The origins of life on earth*. Englewood Cliffs, N.J: Prentice Hall, 1973

L'articulation de ces hypothèses avec les données expérimentales, et notamment le rôle différencié des acides aminés qui, assemblés en chaînes polypeptidiques et puis en protéines, conduisent à la manifestation de fonctions hautement spécifiques et différenciées dans le vivant. Ces fonctions procèdent des structures tridimensionnelles des protéines : séquences formées par l'enchaînement d'unités élémentaires (structure primaire), repliements et conformations (structures secondaires et tertiaires) induites par la présence de multiples attractions au sein de ces chaînes elles même. Et par ailleurs, la constitution de ces rôles fonctionnels très différenciés portés par les protéines : catalyse, promotion, régulation etc. repose sur la capacité des acides nucléiques assemblés en ADN et en ARN à assurer l'essentiel de la conservation et du transport de l'information nécessaire à leur synthèse dirigée.

Ce que recherchent Eigen et Schuster dès lors, c'est se donner les conditions nécessaires permettant d'associer ces deux types de fonctions dès le départ du chemin qui conduirait aux premières formes vivantes. Partant de l'hypothèse d'existence de formes élémentaires de polynucléotides (avec éventuellement des compositions différentes de celles de l'ARN actuel) et de polypeptides que l'on qualifierait de primitifs, on construit un modèle qui organise la coopération entre ces deux catégories de molécules, l'une support d'information et l'autre capable d'exprimer des fonctions spécifiques de réplique et de synthétase. Cette coopération est compatible avec les erreurs rencontrées dans les processus de réplication ou de traduction (les mutations) et supporte alors un processus sélectif conduisant à une évolution cohérente (non disparition) du système coopératif.

La solution envisagée pour intégrer et stabiliser dans un système de coopération coordonnée les fonctions de réplication et de traduction (rôle assuré par les poly nucléotides) et les fonctions de catalyse (rôle assuré par les polypeptides) pour réaliser les synthèses dirigées de polypeptides selon le patron formé par les polynucléotides, sera assurée par leur intégration au sein d'un hyper cycle.

- *Présentation simplifiée des caractéristiques des hyper cycles et application à un modèle de référence associant poly-nucléotides et polypeptides*

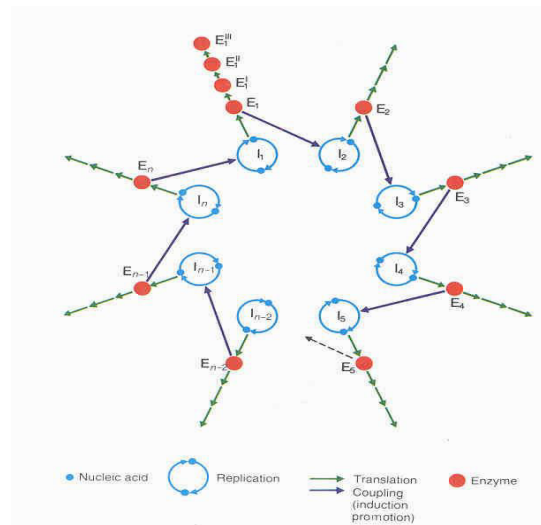
L'analyse formelle des propriétés des systèmes dynamiques, catégorie générale dont font partie les systèmes d'équations différentielles présentées précédemment, permet aux auteurs d'en tirer un certain nombre de conclusions. Celles-ci sont alors à nouveau confrontées aux données empiriques afin de pouvoir les interpréter en termes réalistes et

d'en exploiter les propriétés dans un scénario d'évolution.

L'hypercycle est caractérisé par le nombre de nœuds (n) qui le constitue, et par le degré (p) qui définit le nombre de liens fonctionnels entre eux. A partir de ces caractéristiques, on peut classer sommairement cet objet formel en deux catégories : les hypercycles élémentaires de degré $p=2$ et ceux pour lesquels ce degré est supérieur à 2, ou hypercycles composés. Ce que montre alors l'analyse dynamique de ces types de réseau par la recherche des points de stabilité, (attracteurs) c'est que les liens fonctionnels entre nœuds de l'hyper cycle conduisent à une stabilisation des interrelations. L'hypercycle élémentaire de dimension 2 ne dispose que d'un seul attracteur définissant sa zone de stabilité, alors que ceux de degrés supérieurs peuvent en présenter plusieurs, décrivant un chemin de stabilité.

Ici, l'analyse dynamique destinée à révéler leurs conditions de stabilité est appliquée aux hypercycles intégrant des capacités de traduction et de réplication.

Le graphe des relations entre espèces moléculaires I (polynucléotides) et E (polypeptide) ci-après en présente l'économie simplifiée⁴²⁰ :



421

Hypercycle : graphe des relations entre polynucléotides et polypeptides

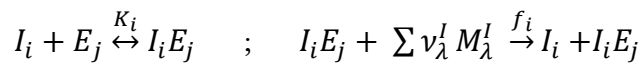
Le modèle fait intervenir n poly nucléotides (I_1 à I_n) et n polypeptides (E_1 à E_n). La réplication des polynucléotides I_n est catalysée par le polypeptide E_{n-1} produit de la traduction de I_{n-1} . Chaque I_i est traduit uniquement en un polypeptide E_i . La mécanique de traduction, qui est à ce stade posée comme principe d'articulation (couplage), introduit des polypeptides dans le cycle. Elle repose sur la formation d'un complexe associant étroitement polynucléotides et polypeptides, partie prenante du cycle. La réplication du polynucléotide est catalysée via le rôle de réplicase ou de cofacteur assuré par le composé polypeptidique du complexe. Les protéines (polypeptides) primordiales exercent dans ce modèle au moins deux fonctions : catalyse de la réplication et catalyse de la traduction.

Sur le plan formel des rapports entre concentrations des éléments qui sont partie prenante du cycle que le modèle mathématisé organise, ce sont à nouveau les schémas réactionnels des cinétiques enzymatiques développées par Michaelis et Menten qui sont

⁴²⁰ Tiré de: Dolev Mor, Ihmels Jan. *Quasi-species, error threshold and hypercycles. A model for Molecular Evolution*. Présentation au Weizmann Institute of Science.

exploités. Le modèle repose sur un système dynamique à $2n$ équations différentielles couplées faisant intervenir les concentrations des différentes espèces de l'hyper cycle ainsi que les concentrations des complexes d'activations $I_i E_j$. Une série (n) d'équations différentielles décrit la cinétique de formation des polypeptides (E_i) et une série (n) décrit celle des polynucléotides (I_i).

La présence de ces complexes d'activation, cohérente avec les formes canoniques des équations chimique décrivant les réactions de catalyse enzymatique,⁴²² permet d'introduire dans le système d'équations phénoménologique des paramètres supplémentaire, les constantes d'équilibres de formation et dissociation de ces complexes conformément au schéma général des cinétiques décrites par Michaelis-Menten :



K_i représente la constante d'équilibre de formation et de dissociation du complexe activé $I_i E_j$, f_i la constante de la synthèse catalysée de « I » à partir de v M nucléotides (λ types de nucléotides). C'est cette catalyse enzymatique, présente dans les modèles cinétiques du système à deux séries d'équations différentielles à travers les constantes K_i et f_i , qui organise la coopération stabilisant les deux familles de composantes de l'hypercycle. Elle introduit donc un nouveau paramètre dans le système dynamique, paramètre qui joue un rôle structurant des propriétés manifestées par ces hypercycles. Les simulations numériques montrent une dépendance forte de l'évolution des concentrations dans le temps des espèces coopérant dans l'hypercycle aux valeurs de ces paramètres : oscillation des concentrations qui s'amortissent au fil du temps et au-delà d'une valeur critique de la constante K , ou amplification et stabilisation.

⁴²² Molecular Biology of THE CELL. Fourth Edition. *Garland Science*, 2002, pages 161 et suivantes.

- *L'hyper cycle, potentiel d'une dynamique d'évolution.*

L'analyse topologique complète de cette famille d'hypercycles⁴²³ montre que cette structure de coopération fournit les conditions de stabilisation d'un système polynucléotides-polypeptides. Les attracteurs identifiés se situent au sein de plages de concentration en diverses espèces moléculaires réalistes et garantissent la coexistence stable au sein du cycle. Ce système de coopération autorise alors une croissance cohérente de l'ensemble de ses membres. L'hyper cycle ainsi formé est en compétition avec toute autre unité auto répliquative, que cette unité soit indépendante ou partie prenante d'un autre hyper cycle, ou encore liée au cycle envisagé par un couplage parasite. L'hypercycle peut grandir ou diminuer de taille (nombre de nœuds) si cela procure un avantage sélectif.

Mais généralement, les hypercycles ne se prêtent pas aisément à la formation de liens inter cycles. Par exemple deux hypercycles de degré p nécessitent un degré de couplage de degré $2p$ pour être stabilisés. Par contre les couplages internes et les propriétés de coopération peuvent évoluer pour atteindre un optimum de fonctions. Les avantages acquis à travers des mutations qualifiées de « phénotypiques » sont directement stabilisées au sein du cycle. Par contre, les avantages « génotypiques » qui favoriseraient l'émergence d'un nouveau produit (de traduction) suite à une mutation dans les unités répliquatives, nécessiteront une forme d'isolement spatial pour pouvoir se fixer. On notera ici, à ce stade d'évolution, que le dogme central de la biologie moléculaire n'est pas respecté.

La sélection d'un hypercycle est irréversible. En effet, ses avantages sélectifs ne dépendent pas uniquement des paramètres cinétiques intrinsèques. Ils sont amplifiés par la concentration des populations en raison des propriétés de non linéarité de ces systèmes. Une fois établi, un hypercycle ne peut alors être remplacé aisément. L'ensemble est donc, sous certaines conditions, susceptible de conduire à un effet sélectif non linéaire, de type tout ou rien qui donne consistance aux hypothèses de goulet sélectif. La survie de cette structure ressemble à celle d'une espèce qui serait la plus adaptée, disposant de la

⁴²³ Eigen M., Schuster P., The Hypercycle. A principle of natural Self-organisation. Part B, déjà cité.

meilleure combinaison en termes de couplage des composants du cycle ainsi qu'en termes de rapidité et de qualité de réplication. L'effet sélectif fort résulte alors de la non linéarité du système.

Cependant, pour Eigen et Schuster, l'hypercycle n'est qu'une forme d'organisation transitoire de la matière. Dès lors qu'une machinerie enzymatique plus sophistiquée se fait jour, offrant des taux de réplication fiable élevés, il a vocation à disparaître au profit d'une stabilisation au sein de proto-cellules grâce à des mécanismes différents.⁴²⁴

3.3.2 Cycles, hyper cycles et auto-organisation de la matière : vers le scénario d'une réalité possible.

Le modèle de l'hyper cycle intégrant deux natures de molécules, celles qui auront vocation à porter le code génétique et celles qui auront vocation à évoluer pour devenir le support du phénotype, possède une triple valeur. Il a une valeur heuristique dans la mesure où l'étude même des conditions de stabilité permet d'acquérir des données précieuses pour imaginer les scénarios d'évolution possibles. Et par là, il introduit également à la conception d'une représentation simplifiée d'une réalité évolutive possible et enfin il fournit les bases d'un modèle théorique d'explication de l'origine de la vie.

- ***Les origines possibles d'un système coopératif de réplication et de traduction.***

Pour réaliser pleinement sa vocation explicative et heuristique il importait de confronter le modèle formel aux données empiriques, produites par la biologie moléculaire des années 1970 à 1980, de le « caler » sur les théories de la chimie prébiotique.

Un des problèmes qui se pose en effet, c'est pouvoir imaginer l'origine même d'un

⁴²⁴ Voir par exemple le modèle des correcteurs stochastiques d'erreurs présentés par Smith Maynard J., Szathmary Eörs , *The Major transitions in Evolution* : chapitre 4.6 p 55 (déjà cité). Leur mise en place est rendue possible par l'individualisation des systèmes répliatifs.

tel système coopératif, faire notamment émerger un code signifiant à partir de ce qui pourrait être une « soupe » primitive, un chaos moléculaire d'où devait nécessairement surgir une structure organisée. On essaye d'élaborer un scénario qui conduirait à l'émergence d'un hyper cycle stabilisant un appareil primitif de réplication et de traduction. L'origine en serait une quasi-espèce moléculaire (cf. 3.1.2) qui évoluerait par voie de mutation et de duplication des gènes afin d'atteindre une complexité plus grande. Mais comment concevoir cette fois-ci l'émergence de ce type de famille de molécules ?

La piste suivie est éclairée par l'étude des ARN de transfert ainsi que par celle de l'activité catalytique de certains autres ARN. Cette étude a permis de valider la formation d'un mécanisme d'hypercycles reposant sur l'affectation du rôle de codons-anticodons à ceux des acides aminés susceptibles d'être synthétisés dans des conditions a biotiques (homologie avec la boucle anticodon des ARN de transfert). Ce mécanisme s'inspire des fonctions duales de réplication et de traduction possédées par certains ARN et de l'étude de l'organisation structurelle et fonctionnelle de cellules procaryotes ainsi que par le rôle assuré par la présence de facteurs de couplage.

Afin d'insérer le modèle dans une problématique réaliste, la question posée porte sur les conditions de formation originelles du mécanisme de translation, de synthèse dirigée par un polymère (les polynucléotides) jouant le rôle de matrice pour une autre substance formée de peptides. Ce que l'on vise comme point d'aboutissement, c'est donc la mise en route d'un mécanisme qui reconnaisse sélectivement des peptides, les assemble sur un mode homologue aux mécanismes opérant dans le vivant actuel et par là l'inscrit dans les principes généraux d'appariement définis par le code génétique actuel qui assignent à un triplé de nucléotides une classe d'acides aminés déterminée.

Le problème réside alors dans le degré de connaissance des conditions initiales prébiotiques favorables à l'existence d'acides aminés sous forme monomérique (unitaire et non lié) car avant même leur intégration dans un processus coopératif de type hypercycle, il est nécessaire que des formes primitives d'acides polynucléiques se soient formées, aient pu se répliquer et également qu'un appareil de traduction élémentaire ait pu se mettre en place.

Ce que l'on veut modéliser au sein de l'hypercycle, c'est la coopération de molécules qui assurent d'une part la fonction de réplication (et dont les candidats chimiques sont des poly nucléotides en raison de leur potentialité répliquative avec un

relatif faible taux d'erreur) avec d'autre part des molécules assurant des fonctions de réplique (catalyse de la réplication) et de synthétase (catalyse de la formation de polypeptides dirigée par la matrice poly nucléotidique).

L'étude formelle de ces relations de coopération a livré les critères de stabilisation entre de telles entités, ainsi que de leur potentialité d'évolution dans un environnement qualifié de darwinien. Mais pour que ce modèle puisse effectivement rendre compte d'un cheminement possible vers le vivant actuel, il est nécessaire de donner une consistance, une « chair » chimique aux entités abstraites « I » et « E ». Eigen et Schuster donnent une interprétation de ces entités à la lumière des connaissances que les sciences du vivant ont su produire, et en infèrent par régression de l'actuel vers ce passé lointain l'existence des seules fonctions strictement nécessaires à la mise en mouvement d'une organisation primitive de la matière. En leur donnant une coloration réaliste, celle livrée par des chimistes qui ont tenté de reconstituer la nature des composés de la soupe primitive originelle, on peut alors prétendre à décrire un scénario d'évolution plausible.

Dans cet ordre d'idée, le point décisif c'est celui qui permet d'envisager la formation, à partir d'espèces chimiques concrètes, de l'appareil de traduction, mécanisme qui permettrait de piloter la synthèse de protéines. L'analyse de l'ARN de transfert et de sa boucle anticodon, sa structure de repliement, le mécanisme de croissance des chaînes polypeptidique dans leur synthèse dirigée, les règles d'affectation des acides aminés aux codons correspondants, constituent la base de ce travail.

- ***La chimie prébiotique.***

Grâce aux travaux, notamment de Miller et Orgel,⁴²⁵ Eigen et Schuster conçoivent une situation de départ, un état comportant des matériaux riches en énergie formés d'acides aminés, de différents nucléotides incluant l'une des quatre bases azotées de la chimie du vivant (adénine, guanine, cytosine, uracile), et comportant également des peptides sous forme de protéinoïdes ainsi que des substances de la forme d'ARN de

⁴²⁵ Miller, S.L., Orgel, L.E.(1973): *The Origins of Life on Earth*. Déjà cité.

transfert possédant des séquences aléatoires. (Hasard pour ce qui concerne la structure primitive mais dont les structures tertiaire et secondaire seront strictement déterminées par la fixation de l'ordre des séquences dans cette structure primaire, ce qui déterminera alors leurs propriétés fonctionnelles).

Dans cette situation initiale, on ne pré suppose pas la présence d'une machinerie spécifique à base de protéines comme des polymérases, des synthétases ou encore une machinerie ribosomale. Néanmoins, cela n'interdit pas la possibilité d'un rôle catalytique fortuit assuré par des oligomères ou par des surfaces catalytiques solides (catalyse hétérogène liquide-solide). L'ensemble ainsi décrit constitue les facteurs environnementaux du modèle.

Les travaux menés dans le domaine de la chimie prébiotique militent pour une plus grande facilité de formation de deux bases puriques : l'adénine, et la guanine. Pour ce qui concerne les bases pyrimidiques, des chemins différents seront imaginés afin de synthétiser la cytosine ainsi que son produit d'hydrolyse, l'uracile. Eigen note cependant que l'on peut affirmer peu de choses à ce stade, concernant les concentrations respectives de ces composés. Ceci, en toute rigueur a une incidence sur la cinétique de formation d'oligomères et de polymères à partir de ces composés en raison de leur dépendance à la concentration en substances élémentaires entrant dans leur formation.

Un fil conducteur permet d'inférer les composés polymériques pouvant s'insérer dans le processus d'entrée dans la voie de l'auto-organisation darwinienne. C'est celui de la connaissance des propriétés d'appariement et de stabilité des composés à la base des différents nucléotides. Il apparaît au regard de cette exigence, que les composés comportant de la guanine et de la cytosine apportent une stabilisation au sein d'un ensemble coopératif largement supérieure à ce que réaliserait une paire adénine et uracile. Par ailleurs, ces bases sont portées par une « colonne vertébrale » formée dans les organismes vivants actuels d'une chaîne ribonucléique formée d'unités ribose reliées par un pont phosphodiester. En chimie prébiotique cette colonne vertébrale est

éventuellement remplacée par des unités furanose voir par une colonne vertébrale faite entièrement de peptides comme ceux d'une protéine, les principes d'appariement subsistant néanmoins. Ce dernier composé appelé PNA ⁴²⁶ est réputé plus facile à synthétiser dans des conditions abiotiques.

Et dans cet ordre d'idée, l'abondance relative de la présence en guanine et cytosine par exemple, est déterminée par les cinétiques différenciées de synthèse (Incorporation d'unités monomériques) des polymères correspondants. Il apparaît que l'amorçage de composés incorporant les bases comme la guanine (G) et la cytosine(C) est également plus aisée que l'insertion de composés d'adénine (A) et d'uracile. (U)

- ***Le scénario d'une évolution possible vers le vivant.***

Les modèles expérimentaux et leur confrontation avec les données issues de l'exploitation de cycles autocatalytiques simples permettent d'envisager la constitution de polynucléotides comportant des séquences G-C de l'ordre de 20 à 100 unités, alors que les séquences comportant les nucléotides de type A, U n'excèderaient pas 10 à 20 résidus.

Cette richesse en composés G, C, est reconnue comme étant favorable à la fois à la nucléation d'activité de type réplication ou de type traduction à partir de l'examen d'éléments proche des ARN de transfert.⁴²⁷ L'activité traduction est accompagnée de l'émergence d'une structure en « codon » (sur le modèle des boucles anti codon des ARN de transfert). Il paraît donc vraisemblable que ces premiers codons aient été formés à partir de résidus dans lesquels les composés en G et C prédominaient. Des conclusions tirées de l'étude des codes sans ponctuation conduisent les auteurs à proposer les étapes suivantes :

- Les premiers codons auraient pu être de la forme 5'GGC et 5'GCC qui sont complémentaires en position anti parallèle. Ces types de codon réfèrent d'ailleurs aux acides aminés les plus simples qui sont la glycine et l'alanine, et conduisent à la

⁴²⁶ PNA pour : Acide Nucléique peptidique, traduction de *Peptide Nucleic Acid*.

⁴²⁷ Crick F. H. C., Brenner S., Klug A., and Piecznik G., A speculation on the origin of protein synthesis. *Origins of Life*, 1976, 7 : 389-397

- formation de peptides relativement aisément synthétisables en conditions abiotiques.
- L'étape suivante consisterait alors en l'incorporation dans le réseau formé par les séquences G et C d'éléments d'adénine (A), monomère relativement abondant (cf. supra). Les séquences de type A jouent le rôle d'imperfections modifiant l'ordonnement du réseau linéaire formé par les combinaisons G, C de l'étape précédente. L'intérêt est alors de disposer d'un équivalent ARN de transfert qui aurait un point de rupture des liaisons hydrogènes (point de fusion) inférieur à celui d'ARN formé avec les seuls résidus GC. Il est clair que cela facilitant le processus de réplication (par auto catalyse), ces formes seraient alors avantageusement sélectionnées pour conduire alors à l'émergence d'une quasi espèce.
 - Sachant alors que le complémentaire uracile (U) de l'adénine (A), résulte de l'hydrolyse de la cytosine (C), l'évolution de la quasi espèce précédente semblerait alors aller de soi. Elle mène à la formation de codons plus variés ouvrant la palette de traduction des acides aminés : les codons de type 5'GAC et 5'GUC, résulteraient de mutations des paires précédentes, et pourraient alors être partie prenante du cycle auto catalytique de la quasi-espèce précédente. On jouerait ici sur les rôles différenciés de deux brins d'ARN complémentaires, le brin négatif pour piloter une synthèse et le brin positif pour se répliquer, le tout lié dans un cycle catalytique simple.
 - A ce stade, d'autres différenciations fonctionnelles peuvent alors intervenir qui seront stabilisées dans un hyper cycle. Les nouvelles protéines, synthétisables en raison de l'élargissement des capacités d'assignation (enrichissement des codons) peuvent avoir des rôles fonctionnels spécifiques tels que celui de facteur de couplage, augmentant l'efficacité des traductions.
 - L'appareil de traduction évolue encore vers une adaptation plus fine. Les interactions plus lâches en 3ème position du codon (*wobble* position) permettent d'aller vers un code de type purine-pyrimidine ce qui étend le champ à l'utilisation de l'ensemble des quatre acides aminés (A, U, G, C) et ouvre en conséquence de larges perspectives de synthèse recourant à l'intégralité de l'alphabet formé par ces composants.

La corrélation entre l'installation de ce code, le potentiel d'association à des acides aminés déterminés et l'abondance relative de ces mêmes acides aminés au sein de la « soupe » primordiale paraît élevée. Ce qui frappe, c'est la concordance entre l'abondance relative des acides aminés les plus simples comme l'alanine, la glycine, la valine etc. retrouvée soit en synthèse pré biotique ou en synthèse exobiologique (Météorite de

Murchinson)⁴²⁸ indiquant la vraisemblance de l'évolution des capacités de codage en corrélation avec l'abondance relative des premiers acides aminés. Il paraît ainsi probable que les premières protéines soient formées de copolymères de glycine et d'alanine.

La question critique reste néanmoins l'origine de la formation en hypercycle. En se plaçant du point de vue des conditions d'émergence d'une telle structure, ce qui est requis, c'est l'abondance relative de tous les membres du cycle assurant les différents rôles fonctionnels décrits précédemment.

On fait face au paradoxe suivant : toutes les matrices de polymérisation dépendent de catalyseurs qui favorisent leur synthèse, mais ce catalyseur pour se former a besoin lui-même de matrice de polymérisation. Si on rejette l'idée d'une fluctuation accidentelle, d'un hasard miraculeux ou encore la superposition heureuse de deux types de cycles autocatalytiques, la nécessité d'un précurseur présent en abondance permettant l'émergence de l'hypercycle via un mécanisme de mutation et de sélection, s'impose.

La conception de cet amorçage exploite les différences de rôles assignables aux deux brins complémentaires d'ARN primitifs : la réplication d'un brin positif conduisant à un brin négatif etc.

La nature même de cet ARN primitif a fait l'objet de réflexions spéculatives prenant en compte les facilités des réactions chimiques élémentaires de synthèse des nucléotides de base (purines et pyrimidines), la possibilité de disposer de codes signifiants pour la synthèse de polypeptides et en conséquence l'abondance relative de ces différents composés au regard des conditions physico chimiques originelles de la soupe prébiotique, les mécanismes d'appariement possibles entre codons et anticodons, la stabilité des appariements entre bases complémentaires en l'absence d'enzyme assurant cette stabilisation.

⁴²⁸ Du nom du village australien près duquel est tombée la météorite. Son analyse a révélé la présence d'acides aminés rencontrés parmi les organismes vivants terrestres ainsi que des purines et des pyrimidines à la base des ADN et ARN. Voir : Kvenvolden K., Lawless J., Pering K., Peterson E., Flores J., Ponnampetuma C., Kaplan I.R., Moore C., Evidence for Extraterrestrial Amino-acids and Hydrocarbons in the Murchison Meteorite, *Nature*, 1970, 228 : 923-926

Dans des conditions physico chimiques appropriées,⁴²⁹ cet ARN aurait alors une dominante en nucléotides de type guanine et adénine et de petites proportions d'uracile, ce qui permettrait de disposer d'une sorte de pré ARN de transfert, formé de séquences riches en GC, tant que la réplication n'est pas aidée par des enzymes. A ce stade le produit de traduction, lié aux assignations d'acides aminés à l'anticodon primitif de l'ARNt n'est pas encore intégré dans une boucle de type hypercycle, et ne résulte que d'un jeu d'essais et d'erreurs. Cela n'interdit pas un effet sélectif sur les messagers qui forment la quasi-espèce, car dès lors qu'un produit de traduction procure lui-même un effet avantageux dans la reproduction de son messager, celui-ci devient le représentant dominant dans la distribution de la quasi espèce.

Néanmoins, un tel système ne peut évoluer que sous la seule condition que les différentes espèces moléculaires d'ARN du cycle soient chacune stabilisées par l'effet de leur produit de traduction. La conception la plus simple de cette intégration repose sur le jeu d'affectation (assignation) des deux brins d'ARN (d'une espèce dominante). Durant cette étape de quasi-espèce, les brins joueraient le rôle d'adaptateur pour deux paires d'acides aminés de type glycine/alanine pour l'un et pour l'autre celui d'adaptateur des paires de type acide aspartique/valine. Chaque adaptateur correspondrait aux codons complémentaires GGC, GCC et GAC, GUC. Ces codons, seraient alors, via le mécanisme d'adaptation, traduits en deux types de protéines formées au plus des quatre classes d'acides aminés cités.

Si alors, le produit de traduction conférerait un avantage sélectif aux adaptateurs et messagers, ceux-ci s'en trouveraient amplifiés. L'hypercycle catalytique qui se met alors en place intègre la distribution de messagers et les protéines qu'ils codent. Il stabilisera d'un part ces messagers et leurs mutants proches ainsi que d'autre part les deux classes de protéines produites par leur traduction et dont les fonctions nécessairement proches (les messagers formant une quasi espèce sont par nature proches) seront celles de réplicase et de synthétase.

⁴²⁹Miller, S.L. Orgel, L.E (1973) déjà cité.

L'évolution de l'hypercycle résultera du passage de l'autopromotion à la promotion mutuelle des capacités fonctionnelles des protéines qui n'altèrent pas les critères de stabilité de l'hypercycle (stabilité liée aux propriétés de couplage décrits dans le cadre de l'analyse des systèmes dynamiques non linéaires) conduisant à des différenciations dans la population de messagers ou porteurs d'informations.

Notons que dans cette approche qui définit les critères d'émergence d'un hypercycle, comme moyen de stabilisation réciproque d'un complexe de polymères formés d'acides aminés et de nucléotides, il est nécessaire de disposer d'une origine : des précurseurs, des quasi-espèces de nature ARN qui coexistent. Mais la présence de tels précurseurs est-elle même conditionnée par celle d'un système moléculaire darwinien qui constitue la condition de possibilité de leur existence.

Une question surgit néanmoins et qui pose problème aux auteurs. C'est celle du rôle joué par des polynucléotides comme l'ARN, un assemblage complexe qu'il est également hasardeux de vouloir penser se former d'un seul jet. Par ailleurs, il semble reconnu que la synthèse de protéines sous les conditions primordiales requises par les hypothèses d'Eigen soit plus aisée (avec des concentrations de monomères suffisamment élevées), ce qui permet de penser que l'environnement pouvait disposer d'un potentiel de molécules à propriétés catalytiques. De plus, la catalyse en milieu hétérogène est à ce stade aisément envisageable et permet de rendre compte de la possible présence de chaînes suffisamment longues pour que les polypeptides formés exhibent via leur conformation structurale des propriétés catalytiques spécifiques.

Il peut en être de même pour la préfiguration d'un ARN de transfert. Une longueur minimale est requise pour en assurer la stabilité (en absence de structure de repliement, les phénomènes d'hydrolyse reprennent le dessus). Cependant en l'absence d'enzyme de type synthétase il faut pouvoir rendre effectif un fonctionnement qui nécessiterait la reconnaissance simultanée de la boucle d'anticodon et de l'extrémité 3' non appariée (reliée à l'acide aminé). La solution imaginée par les auteurs est un fonctionnement recourant conjointement à deux brins (l'un positif et l'autre négatif) assurant pour l'un le rôle de messager et pour l'autre celui d'adaptateur.

L'ensemble de ces réflexions, combinant étroitement analyse d'un modèle formel

et reconstitution d'une vraisemblance chimique produit un modèle permettant d'élaborer une succession d'étapes nécessaires et d'en définir à chaque fois les conditions de possibilité d'évolution.

Ce qui finalement pilote cette évolution, c'est une dialectique de stabilisation et de mutation pour faire face à des instabilités. Ces instabilités sont celles apportées par l'apparition de mutants avantageux qui déstabilisent les anciennes organisations stabilisées.

De ce point de vue, l'hypercycle est à la fois la solution conceptuelle pour sortir de cette instabilité et une étape dans la dynamique d'évolution. (À partir du stade de cellule, les mécanismes d'auto organisations empruntent d'autres voies).

Le schéma ci-après résume cette histoire évolutive, telle qu'elle a pu être pensée par le recours au modèle des hyper cycles, dans le contexte des savoirs de la biologie des années 70.

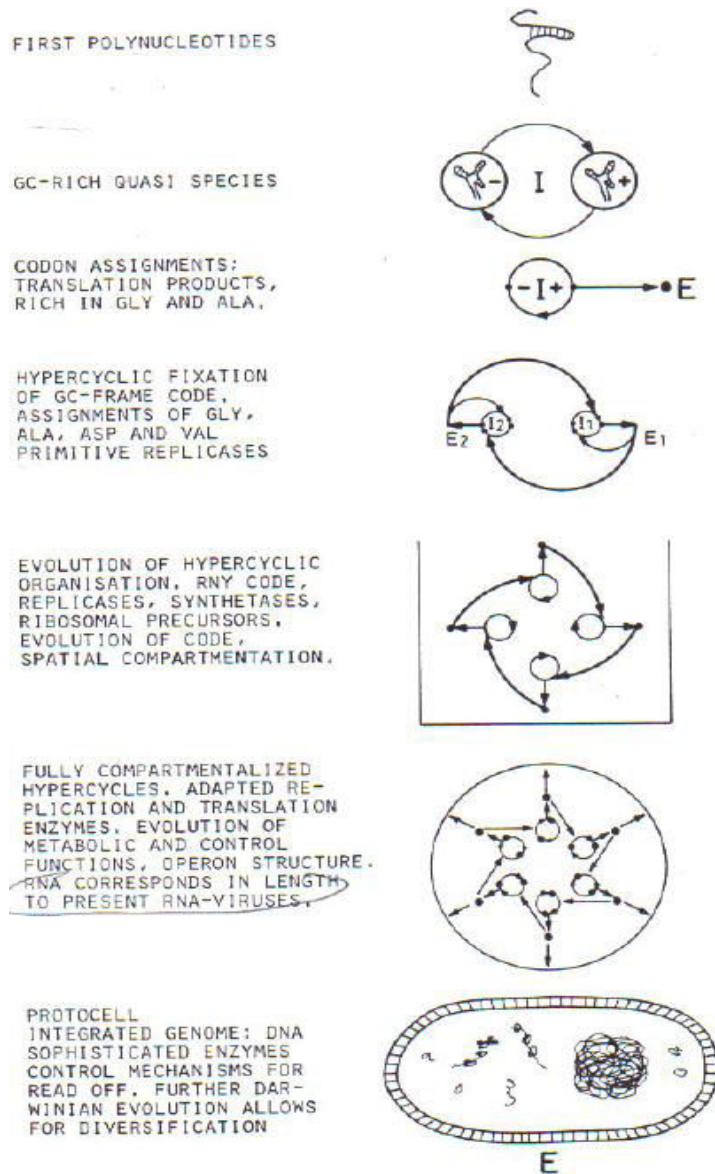


Fig. 63. Hypothetical scheme of evolution from single macromolecules to integrated cell structures

430

D'une simple macromolécule à une cellule intégrée

Le chemin présenté par Eigen et Schuster, partant de la soupe primitive jusqu'à la première proto-cellule passe par cinq transitions majeures :

⁴³⁰ Source : *Naturwissenschaften* 1978,65, page 367

1 Apparition des premières macromolécules dans un contexte d'instabilité structurelle. L'abondance de substances de forme protéinique et la présence de quelques polymères de forme ARN pouvant se répliquer est envisageable.

2 La composition des premiers polynucléotides est dictée par l'abondance relative des composés présents. Les formes dextrogyre et lévogyre existent simultanément ainsi que divers liens esters 2'-5' et 3'-5'. L'abondance de composés riches en G-C assez long, comportant quelques séquences en A-U permet de disposer d'une flexibilité structurelle. Ces séquences reproductibles forment une lignée possédant des propriétés « darwiniennes ».

3 La présence de séquences comportant des codons de type « *comma-free* » les qualifie comme messenger, alors que des brins possédant des formes complémentaires jouent le rôle d'adaptateurs. Les premiers acides aminés sont affectés à ces adaptateurs selon leur disponibilité. Les produits de traduction sont « monotones », consistant en assemblage de glycine et d'alanine. Cela devait également être le cas de la masse de protéines « non informées ».

4 Si l'une quelconque des traductions possibles conduit à la réalisation d'une aide catalytique de la réplication de son propre messenger, alors celui-ci deviendra dominant dans la distribution de la quasi-espèce. Ce processus peut être déclenché par l'environnement « non informé » (non structuré) protéinique.

5 Le mutant du messenger dominant (critères d'évolution de l'hypercycle) est intégré dans la reproduction de l'hyper cycle quand il apporte des avantages supplémentaires. C'est ainsi qu'un hyper cycle avec des assignations de codons différents peut émerger. La formation d'un hyper cycle est un réquisit permettant de disposer d'une évolution cohérente de l'appareil de traduction. Il intègre de plus en plus de mutants, et l'accroissement constant de la fidélité de traduction autorise l'élongation des séquences. Des fonctions enzymatiques différentes (réplicase, synthétase, facteurs ribosomiaux) peuvent émerger de l'union de leur précurseur (duplication de gènes).

6 Les hypercycles complexes ne peuvent évoluer qu'avec des changements phénotypiques : séparation spatiale par compartimentation ou par formation de complexe comme des ribosomes.

- ***La sortie du chaos originel.***

L'évolution doit débiter avec un « chaos » moléculaire correspondant à l'absence d'organisation fonctionnelle des espèces chimiques. L'ordre doit naître d'une phase prébiotique qui relève de la chimie et peut être décrite par les théories physico-chimiques en vigueur. Cette phase est caractérisée par la présence d'une très grande variété de produits réactionnels, constituant ainsi un espace des possibles dans lequel la chimie du vivant n'occupe qu'une place infime.⁴³¹ Cette première phase est conçue par Eigen comme expansive, divergente, et ce n'est que par la voie d'une organisation fonctionnelle sous forme de cycles et d'hypercycles que se réalise la sortie du « chaos » moléculaire.

La mise en mouvement ordonnée par croissance auto catalytique ne peut se produire pleinement que dans des systèmes hors équilibres échangeant en continu avec l'environnement. A l'inverse, l'équilibre chimique résulte de la formation de composés, équilibrée par leur décomposition. De ce fait elle ne crée aucune réalité nouvelle. Cet équilibre est le pendant de la mort biologique dans laquelle les forces de décomposition prennent le dessus sur les forces de composition et défont l'unité organique du vivant. Ce processus de retour à l'équilibre dénoue la réponse, localisée dans l'espace et le temps, de l'organisme à la deuxième loi de la thermodynamique (augmentation de l'entropie) et provoque le retour d'un système chimique organisé vers une collection d'espèces moléculaires sans liens.

Eigen prend donc appui sur la théorie thermodynamique des processus irréversibles développée par Prigogine. Ils sont liés à un état stationnaire loin de l'équilibre thermodynamique et leur enchaînement permet de construire les scénarios d'évolution vers le vivant. Nous avons également vu que la possibilité de développer un certain ordre dans une mixture formée d'une large variété de composés chimiques passe par la formation d'un code fonctionnel auto répliquable. Le mécanisme chimique qui sous-tend cette formation est assuré par des fonctions catalytiques combinées avec des mécanismes

⁴³¹ L'image de cette complexité potentielle est donnée par la base de chimie organique « Beilstein » qui recense toutes les possibilités de réactions entre composés organiques ainsi que leurs voies de synthèse. Cette base est actuellement accessible par « reaxys © ».

de rétroaction. Mais passer au stade dans lequel une collection particulière de molécules s'auto-organise, en actualisant en somme une potentialité de croissance, résulte d'une dynamique qui sélectionne continûment parmi les structures proposées dans la mise en déséquilibre permanente celles qui dans des conditions données présentent la stabilité relative la plus grande, pour dérouler un chemin de croissance auto-entretenu.

Le parallèle avec la théorie darwinienne de l'évolution est tentant : « ...J'ai donné le nom de *sélection naturelle* à cette conservation des différences et des variations individuelles favorables et à cette élimination des variations nuisibles.... »⁴³²

Mais cela pose problème car comme le reconnaît Eigen, quel sens peut-on donner à une sélection en termes moléculaires ? Peut-on dériver, au sens de la réduction inter théorique développée par Nagel⁴³³ la théorie darwinienne de celle des propriétés connues de la matière ?⁴³⁴

3.3.3 Le modèle, support d'une histoire évolutive de la matière.

Les travaux d'Eigen et Schuster ont eu un retentissement certain, tout en suscitant de nombreux commentaires critiques. Pour la première fois un modèle formalisé et complet d'auto-organisation de la matière préfigurant la vie était proposé. D'autres travaux exploiteront les problématiques d'autocatalyses, ceux présentés dans le chapitre précédent ainsi que les travaux de Stuart Kauffman promouvant les ensembles collectifs auto catalytiques (*Collectively Autocatalytic Sets*)⁴³⁵ ou encore ceux d'Addy Pross autour de la théorisation de systèmes répliatifs conçus autour d'ARN.

L'accent est mis ici sur ce qui peut être la source même d'une mise en mouvement

⁴³² Darwin Charles. *L'origine des espèces*. Paris: GF Flammarion, 1992. Et ci-après la version anglaise à laquelle fait référence Eigen: « ...*this preservation of favourable individual differences and variations, and the destruction of those which are injurious, I have called Natural Selection, or the Survival of the Fittest.* » (Darwin Ch. Origin of species chap 4.)

⁴³³ Nagel Ernest, *The Structure of Science*. Routledge & Kegan Paul, 1961.

⁴³⁴ Pour Addy Pross –référence citée- la sélection d'espèce moléculaire au sens développé par Eigen repose sur un mécanisme commun à celui de la sélection naturelle, la « DKS » ou *dynamical kinetic stability*.

⁴³⁵ Kauffman Stuart A., Autocatalytic sets of protein. *Journal of Theoretical biology*.1986,Vol.119, issue 1

ordonnée de la matière pouvant conduire à la vie telle que nous la connaissons. L'objet du travail n'est donc pas d'évaluer la pertinence des approches utilisant les modèles de type hypercycle pour représenter les structures de coopération. A ce sujet d'ailleurs, la littérature abonde de critiques mettant en cause la stabilité de ce type de structure. Les hypercycles peuvent en effet être affectés par des éléments parasites, par exemple un réplicateur lié à un seul membre de l'hypercycle, consommant ce dernier et ne participant pas aux autres étapes du cycle peut conduire à sa rupture.⁴³⁶ Par ailleurs, certains auteurs⁴³⁷ ont montré que le comportement coopératif disparaît lorsqu'on dépasse 5 espèces moléculaires en interaction. Cependant, on observe de grandes différences selon les techniques de modélisation retenues. Les simulations recourant aux automates cellulaires permettent par exemple d'obtenir des cycles robustes qui résistent aux parasites. Dans cette dernière approche, les « gènes » et autres entités sont traités comme des automates autoreproductibles dotés d'un jeu d'instructions qui leur permettent de fonctionner ensemble. Par ailleurs la compartimentation des réactions permet d'en renforcer la stabilité et l'efficacité.⁴³⁸

- ***La modélisation au service d'une histoire.***

Pour prolonger cette mise en perspective critique, il convient également de revenir sur quelques aspects de la chimie des molécules organiques employée par Eigen et Schuster. Le composé privilégié pour conserver la mémoire des processus réactionnels performants est proche de l'ARN de transfert. Certes, cela est compatible avec les théories qui font d'un monde ARN l'antichambre du monde du vivant actuel. (Idée avancé par Carl Woese en 1967 et reprise par Walter Gilbert⁴³⁹). Cette idée est fondée sur les propriétés duales des ARN ribosomiaux : à la fois ribozyme et porteur d'information. En privilégiant un composé de ce type, Eigen se situe dans cette mouvance, mais en conférant à ce composé un rôle fort dès l'origine même de la sortie du chaos moléculaire originel.

⁴³⁶ May Robert M., Hypercycles spring to life. *Nature*, 1991, 353

⁴³⁷ Stadler Peter F., Happel Robert. The Probability for Permanence. 1993, *Math.Biosc.*, 113: 25-50.

⁴³⁸ Szathmary E., Demeter L. *Journal of theoretical biology*, 1987, 128:468-486.

⁴³⁹ Gilbert Gilbert. The RNA World. *Nature*, 1986, 319

Les travaux d'auteurs, comme par exemple Segré et Lancet,⁴⁴⁰ situent dans une perspective différente les conditions chimiques de l'auto-organisation. Ces auteurs privilégient les composés lipidiques dans l'émergence première d'une organisation. Leurs propriétés hydrophobes permettraient de créer, par isolement d'un milieu réactif, les conditions de réactions auto-catalysées. On réintroduit alors à nouveau une hypothèse abandonnée par Eigen, celle du recours au pouvoir catalytique intrinsèque des polypeptides, de leur capacité à former des réseaux auto-catalytiques susceptibles d'évolution. (Kauffman 1995, Smith et Szathmary 1995). La question reste donc controversée. D'une part, le pouvoir catalytique des polypeptides est lié à leur taille, en dessous d'un seuil donné ceux-ci ne disposent pas de ce pouvoir catalytique. Mais d'autre part, ils peuvent s'insérer dans des réseaux auto-catalytiques comportant des propriétés intéressantes.

Sur un plan général, les hypercycles participent d'une démarche de modélisation mathématique appliquée à la biologie. Les systèmes biologiques, comme le métabolisme par exemple, constituent des réseaux modélisables qui peuvent être explorés par plusieurs branches des mathématiques. Ainsi, la théorie des systèmes complexes, une branche de la biologie systémique dérivée de la théorie des systèmes dynamiques, s'est attachée à étudier le comportement et l'évolution de la concentration d'un mélange d'espèces chimiques représentant les molécules disponibles dans les milieux prébiotiques. Cette étude est d'une grande complexité dès que l'on dépasse la situation élémentaire (et artificielle) où deux réactifs purifiés donnent quelques produits, la réaction ne se produisant que dans un sens.

L'évolution moléculaire et l'auto-organisation d'un ensemble métabolique sont approchées au moyen de l'analyse non linéaire (on se place dans les situations où l'on a affaire non pas à quelques variables du système, mais à un continuum de variables et un haut degré de non linéarité.⁴⁴¹ Ces systèmes, décrivant un mélange de nombreuses espèces chimiques, adoptent un comportement complexe, parfois chaotique dont on peut

⁴⁴⁰ Segré D., Lancet D., *Theoretical and Computational Approaches to the study of the Origin of Life*. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 2004

⁴⁴¹ Strogatz S.H., *Nonlinear Dynamics and Chaos : with applications to Physics, Biology, Chemistry and Engineering*. Perseus Book. 2000

caractériser l'évolution qualitativement et quantitativement, en fonction des concentrations fluctuantes des différentes molécules présentes. Ces systèmes font alors apparaître des directions privilégiées, des comportements émergents, liés à leur capacité à se stabiliser autour d'un de leurs attracteurs.

- *Le modèle au cœur d'une démarche explicative.*

Que cherche-t-on à expliquer ? D'abord, bien sûr, ce qui est directement visé par les travaux présentés dans la partie précédente : l'auto organisation de la matière. Mais c'est également, à travers la recherche des raisons qui président à la formation d'une nouvelle structure de la matière, l'origine du vivant actuel qui est posée comme mise en perspective générale. Le travail d'investigation théorique et pratique est alors sous-tendu par un présupposé, un implicite qui identifie vie et matière organisée. Mais pour autant, dans le cadre des travaux menés par Eigen et Schuster, on ne cède pas à la tentation de rechercher un moment singulier, l'apparition d'une forme organisée de la matière. On l'évite en inventant le processus d'émergence qui conduit d'une certaine forme de la matière inorganisée, désignée comme chaos moléculaire, vers les formes vivantes connues.

La démarche présentée se construit autour de propriétés propres à certaines composantes de la matière, dont le jeu réciproque constitue un ordre nouveau aux fondements du vivant. Et ce jeu des propriétés (coopération, catalyse, réplication...) sert en retour à constituer un état de référence, le chaos moléculaire dans lequel ce jeu de réciprocité ne se serait pas encore institué. Ce que l'on cherche donc à expliquer sur le plan scientifique ce n'est plus un événement, un moment, un instant singulier, celui d'une création ou d'un hasard miraculeux, mais l'avènement d'un nouvel état dans lequel l'auto organisation de la matière rendue possible en raison de conditions thermodynamiques et chimiques propices se réaliserait au sein d'un processus menant d'abord à une forme primitive d'organisation de la matière, pour aller ensuite vers des étapes de complexité croissante.

Pour cela, on travaille un entre-deux, entre la sortie d'une matière sans forme et l'arrivée dans l'antichambre du vivant. Ce que l'on décrit et explique, c'est l'émergence d'une nouvelle forme de la matière qui s'organise sous certaines conditions en structures auto reproductibles qui tout en n'étant pas totalement vivante au sens commun, n'en exhiberait pas moins les propriétés fondamentales qui l'anticipent.

On décrit alors un processus diachronique dans lequel le temps (celui des

équations de la cinétique chimique, celui du déroulement des réactions, mais également celui qui rend possible les rencontres fortuites entre molécules) impose le passage de la matière inorganique, minérale d'abord (au sens de la chimie minérale), à la matière organique ensuite. C'est la formation de molécules organiques dont la nature présente des homologues nombreuses avec les molécules du vivant actuel : acides aminés, acides nucléiques, composés organophosphorés. Puis, à partir de cette base organique, c'est le processus d'émergence de la capacité d'auto-organisation de formes matérielles, susceptibles d'entrer dans un champ de pression sélective et conduisant par-là aux différentes espèces vivantes connues, celles de l'actuel écosystème, mais également celles du passé décrites par le paléontologue. On explique ainsi l'émergence d'une organisation dotée d'une certaine stabilité, apte à se « re » produire avec des variations afin que le processus de sélection et d'adaptation s'exerce pour rejoindre alors la longue chaîne évolutive du vivant.

C'est donc une démarche ambitieuse par certains moments, mettre à jour ce qui peut conduire la matière à s'organiser (pourquoi, comment), mais également modeste, dans le sens où en ne définissant pas *prima facie* la vie, la première forme vivante, on s'évite le vertige de questions métaphysiques relatives à l'être même de cette entité, pour ne l'aborder qu'au travers d'un phénomène, l'auto organisation, qui rend possible l'élaboration d'un déroulement, d'une histoire...

Nous pouvons ainsi décrire et analyser ce qu'il s'agit d'expliquer, l'*explanandum* du schéma explicatif déductif nomologique de Carl Hempel⁴⁴² dans lequel on chercherait à identifier la cause, l'*explanans*. Il serait formé en bonne logique scientifique d'une partie théorique, et d'une autre décrivant les conditions initiales permettant d'en déduire l'*explanandum*. Cette forme générale d'argumentaire pose néanmoins problème dans notre contexte. On conçoit parfaitement qu'en terme de justification de l'explication il faille se rapprocher de ce type d'articulation, entre ce qu'on veut expliquer et les faits et théories qui en rendent compte : mais comment constituer cet *explanans*, sa structure ?

⁴⁴² Hempel Carl . *Eléments d'épistémologie*. Armand Colin, 2em édition, 2006

Ici, la partie théorique est constituée à partir des connaissances actuelles du vivant, de sa (bio) chimie, de son caractère de système évolutif soumis à la sélection naturelle, de la connaissance de la variété des formes existantes, actuelles ou dans le passé documenté par la paléontologie, de ses interrelations avec l'environnement enfin. Ces connaissances doivent être confrontées aux conditions physico-chimiques originelles compatibles avec nos connaissances de la géologie terrestre de l'Hadéen. Elles mobilisent alors, pour être opératoires dans le processus explicatif, un schéma théorique rendant compte de l'émergence des formes organisées susceptibles d'évoluer sous une pression sélective.

- *La modélisation comme médiation entre lois nomologiques et données empiriques.*

Dans cette recherche, on ne dispose pas d'une théorie achevée, d'un ensemble de lois formant un corps cohérent permettant de prévoir et expliquer l'avènement d'un fait nouveau à partir de conditions initiales parfaitement connues. Ce que l'on recherche c'est élaborer une explication qui rende compte du passage du non organisé à l'organisé, du chimique au biologique, et dans cet effort explicatif, les lois disponibles pour servir de fondement à l'*explanans* sont d'une part celles de la physicochimie et d'autre part la loi de la sélection naturelle, source de l'évolution et de la diversification des vivants. Mais pour ce qui concerne plus spécifiquement l'objet même de l'étude, on ne dispose plus que d'éléments méta théoriques comme la théorie des systèmes. Dès lors, le schéma explicatif proposé par Eigen et Schuster est élaboré autour d'un modèle physico chimique dont le support formel est constitué à partir des systèmes dynamiques non linéaires. Ce modèle sert ainsi de médiateur entre des champs disciplinaires tels que la thermodynamique, la cinétique chimique catalysée et un champ empirique constitué par la biologie moléculaire. Il possède à la fois une valeur heuristique et une valeur explicative.

Ce modèle formel incorpore donc des éléments abstraits de lois existantes (cinétique enzymatique, règles d'appariement des nucléotides, etc.) et leur exploitation finalisée par le moyen des simulations numériques. Mais c'est également sa confrontation avec des données empiriques (par exemple les structures de l'ARN qualifiées d'archaïques, les données d'exo biologie ou de chimie prébiotique) qui permet d'élaborer de nouvelles hypothèses, de penser de nouveaux principes organisateurs. A ce titre l'étude des propriétés propres aux systèmes dynamiques « concrets », application de la théorie des systèmes dynamiques non linéaires : objets mathématiques exhibant des propriétés remarquables, à la dynamique de réactions chimiques, impose un certain nombre de conclusions qu'il s'agit alors à nouveau de confronter à la réalité phénoménologique de

nature expérimentale, ou encore à des inférences fondées sur d'autres approches théoriques de nature purement chimique. (Voir les travaux de Crick et Orgel)

La lecture et l'étude fine des travaux d'Eigen et Schuster permettent de faire des remarques sur l'art même du modélisateur. Le modèle formalisé est bâti en partant de principes que l'on abstrait d'une réalité connue expérimentalement, la déconnectant ainsi de cette actualité immédiate, pour en extraire le principe général qui servira de guide au modèle, notamment dans le choix des aspects phénoménologiques qui seront traduits dans les équations choisies. Il en est ainsi, par exemple, du traitement réalisé de ce que Eigen appelle le « principe darwinien » dont on retient la reproduction avec changement et la sélection par adaptation des espèces biologiques, pour le transposer dans le monde chimique en terme de réplication avec variation et stabilisation par couplage.

Il ne s'agit donc pas de fournir la loi générale qui permettrait de décrire l'intégralité d'un processus se déroulant depuis l'origine (la stabilisation du globe terrestre par exemple) jusqu'aux premières espèces vivantes, mais de construire un outil combinant simplification du réel (phénoménologique), relations physico chimiques élémentaires pour, sous conditions issues d'hypothèses expérimentales (conditions d'origines etc.), produire des résultats qui peuvent alors être confrontés à la question posée : pourquoi et comment la matière (c'est-à-dire un ensemble complexe et différencié de molécules) s'est-elle organisée sous ses déterminations propres en se constituant en unités auto reproductives évoluant, grâce aux erreurs du processus de réplication, vers des ensembles plus complexes incorporant progressivement des fonctionnalités nouvelles, pour aboutir enfin aux formes vivantes actuelles.

Il y a donc un art pour construire un modèle permettant de dire quelque chose sur un monde disparu. Cet art qui permet d'élaborer une représentation simplifiée d'une réalité en jouant sur une sorte d'aller-retour, entre un formalisme fondé sur les démarches d'abstractions formelles de la réalité actuelle du vivant, et sa traduction dans un appareillage mathématique, pour enfin disposer d'un outil exploitable autorisant des prédictions fructueuses : seuil d'erreur catastrophique, stabilisation par couplage enzymatique (catalytique).

La démarche méthodologique fait appel à une approche pluridisciplinaire en raison même des obstacles épistémiques qu'il s'agit de surmonter. Par-là, elle se constitue en une sorte de creuset unificateur d'un grand nombre de disciplines scientifiques. Elle

associe deux styles de théorisation. Le premier, que l'on pourrait qualifier d'expérimental, privilégie la possibilité de vérifier par des expériences cruciales des hypothèses induites par l'étude des formes vivantes actuelles, ou encore qui ont laissé des traces analysables dans les couches géologiques indexant leur position dans l'échelle du temps. A ce style, on opposera alors une approche plus formelle, plus mathématisée, destinée à fournir les réponses à des questions majeures formulées en terme d'étapes de transitions : passage du chaos à l'ordre, stabilisation de structures, constitution d'un génome, et mettre ainsi en évidence les mécanismes sous-jacents aux phénomènes vivants constaté ou subodorés.

Ces questions ont été reprises par Orgel,⁴⁴³ ou encore par de Duve dans « Singularité, Jalons sur les chemins de la vie » (2005).⁴⁴⁴ Ce prix Nobel de médecine propose ainsi à chaque étape significative les expérimentations permettant de tester une série d'hypothèses. Les démarches évoquées accordent un poids conséquent et premier à la chimie du vivant à travers l'affirmation d'un principe, celui de congruence, systématiquement mobilisé pour élaborer les hypothèses à tester. A l'opposé, les modèles de vie artificielle, recourent massivement aux formalismes mathématiques, aux simulations sur ordinateur.⁴⁴⁵ La communauté scientifique se partage ainsi entre deux styles d'explications : un style hautement formalisé et à côté, des praticiens et expérimentateurs qui élaborent des démarches plus historiographiques, dans lesquelles on élabore un scénario d'ensemble comportant des points clefs de passage reproduisant les enseignements issus d'expérimentations, ou comportant des analogies avec des processus et connaissances actuelles de la chimie du vivant.

De ce point de vue Eigen et ses collaborateurs réalisent une association étroite entre formalisme et approches expérimentales. L'accent y est certes mis sur la maîtrise du formalisme mathématique (maîtrise des approximations nécessaires, par exemple, pour représenter un état stationnaire hors équilibre) mais l'approche se nourrit également très fortement d'une connaissance fine des données de la biologie moléculaire disponibles

⁴⁴³ Orgel L.E., The origin of polynucleotide-directed protein synthesis. *Journal of Molecular Evolution*. 1989, 29: 465-74

⁴⁴⁴ de Duve Christian, *Singularités, jalons sur les chemins de la vie*. Odile Jacob Sciences, 2005

⁴⁴⁵ Billoud Bernard, *Approche informatique des origines du vivant*. Université Pierre et Marie Curie-Paris 6, Atelier de bioinformatique. http://www.u-bordeaux1.fr/exobio07/fichiers_cours/Billoud.pdf

entre 1970 et 1978.

- ***Quelle définition de la vie ?***

Contrairement aux modèles précédents, la démarche ici ne s'organise pas autour d'une définition explicite de la vie, ne donne pas des critères nécessaires et suffisants permettant d'attribuer le caractère vivant à telle ou telle structure matérielle. A contrario, le modèle ou plutôt l'articulation du modèle de cycle autocatalytique avec celui de l'hypercycle définit les conditions d'animation de la matière afin qu'elle puisse déboucher sur la vie telle que nous la connaissons. A la définition se substitue une histoire jalonnée d'étapes conduisant à l'acquisition de propriétés nouvelles, allant jusqu'aux qualités complètes de l'organisme vivant élémentaire. Il s'agit donc d'un processus éminemment temporel rendant possible l'apparition de nouveautés.

Ici, la capacité d'évolution d'un système matériel apparaît comme étant au fondement de ce qui deviendra par la suite de l'histoire évolutive un système vivant.

Au-delà de la technique de modélisation employée, ce que capte l'approche éminemment évolutionnaire d'Eigen, c'est une propriété, la capacité d'évolution sous contrainte mais sans borne temporelle, d'un système matériel possédant un noyau réplicatif. Par-là, elle anticipe des démarches plus récentes, fondées sur la stabilité dynamique associée aux propriétés de certaines réactions de réplifications. Autour du concept de « *D.K.S* » (*Dynamical Kynetics Stability*), c'est la stabilité et l'évolutivité qui sont étroitement imbriqués pour penser un moteur d'évolution permettant à des systèmes chimiques réplicatifs d'évoluer d'un état cinétiquement moins stable vers un état plus stable, ce processus dynamique résultant de l'accélération des vitesses de réplification.

Ce modèle conduit d'ailleurs à mettre en œuvre un principe évolutif commun au monde biologique et ante biologique, les systèmes matériels organisés simples et ceux plus

Les Modèles du Vivant :

complexes ayant tous tendance à évoluer vers des « D.K.S » plus élevés.⁴⁴⁶

⁴⁴⁶ Addy Pross. *What is Life ?* Déjà cité.

3.4 Modèles : ce qu'ils nous apprennent sur la compréhension du vivant

3.4.1 Modèles.

Les trois modèles étudiés illustrent la polysémie associée au terme même.⁴⁴⁷ Un modèle peut en effet viser la représentation d'une partie du monde, d'un ensemble de phénomènes, de données, mais peut également représenter une théorie en proposant une interprétation des lois et axiomes qui la constituent.

Les études phénoménologiques permises par un modèle reposent généralement sur la connaissance scientifique des caractéristiques fondamentales de l'objet à modéliser. Ce sont par exemple la maquette d'un pont pour en étudier la dynamique, la double hélice comme représentation de l'ADN, l'atome d'hydrogène représenté par un électron orbitant autour d'un noyau (Atome de Bohr), le modèle « clef-serrure » pour représenter les interactions allostériques etc. et dans notre cas par exemple le *chemoton* comme représentation d'un vivant élémentaire. Les questions qui se posent sont d'une part pourquoi peut-on dire qu'un modèle représente un phénomène et quels sont les styles ou types de modèles employés qui participent de l'art de modélisation ?

Les modèles d'échelle, ou maquettes, implicitement ou explicitement, partent du principe que les variations d'échelles conservent l'essentiel des phénomènes étudiés. Ce type de modèle sera qualifié d'iconique dans le sens où il ressemble en partie à ce que l'on essaye de représenter (En conservant la possibilité d'organiser une montée réaliste vers l'objet modélisé via le maquetage, le prototypage...).

Les modèles idéalisés procèdent d'une simplification délibérée de quelque chose

⁴⁴⁷ Ce point d'introduction a été réalisé en exploitant plusieurs sources : « *model theory* » du site plato.stanford.edu ; Cartwright N., *How the laws of physics lie*. Clarendon Paperbacks, Oxford University Press, 1983. Kupiec J-J., Lecoindre G., Silberstein M., Varenne F., *Modèles, simulations, systèmes*. Collections « Matériologiques » Editions Syllepse, 2008. Fox Keller Evelyne. *Making sense of life : Explaining Biological Development with Models, Metaphors, and Machines*. Harvard University Press, 2009

de compliqué afin de rendre l'objet modélisé plus aisé à étudier. (Absence de frottements, système isolé etc..). Ils procèdent de deux démarches d'idéalisation. L'une, qualifiée d'aristotélicienne, dans laquelle l'idéalisation conduit à dépouiller en imagination les propriétés de l'objet à modéliser de celles qui ne sont pas pertinentes au regard du problème traité. On se concentre ainsi sur un ensemble limité de propriétés isolées (ou isolables) de leur contexte. C'est par exemple le système planétaire réduit à un mouvement de masses. L'autre, appelée Galiléenne, dans laquelle on s'autorise des distorsions délibérées, par exemple les points matériels dotés d'une masse mais sans volume, les agents rationnels dans certaines théories économiques, l'étude de populations isolées...

Que représente alors un modèle qui assume une distorsion par rapport à la réalité ? Opère-t-il comme un passage à la limite, comme une représentation d'un comportement limite ? Cela pose problème, car ce passage à la limite (comme l'abolition du frottement par exemple) n'est pas possible dans tous les domaines. Ne s'agit-il finalement que de caricatures et donc d'une accentuation volontaire des traits qu'il est le plus intéressant à étudier ? Par ailleurs, rendra-t-on le modèle plus réaliste, ou épistémologiquement plus intéressant en le dés-idéalisant ?

Une autre façon de modéliser est de procéder par analogies. Ce sont par exemple les gaz parfaits que l'on modélise comme jeu de boules de billards, ou encore le modèle ressort amortisseur comme modèle des ondes en optique ondulatoire. Il y a analogies encore lorsqu'on peut identifier des propriétés partagées : terre, lune, *mus musculus* (souris), *escherichia coli*, *drosophile mélanogaster*. Mais également analogie parce que des propriétés pertinentes sont communes : propriétés ondulatoires de la lumière et du son; ou encore analogies via la ressemblance des relations entre parties (Ces analogies renvoient aux métaphores), de ressemblances formelles renvoyant à une analogie de structures (pendule, circuit électrique).

Les modèles phénoménologiques peuvent représenter les phénomènes observés sans faire d'hypothèses sur des mécanismes sous-jacents. Ils ne sont pas explicitement liés à une théorie.

Par ailleurs on signalera deux autres acceptions du terme modèle : l'un pour les modèles de données (Suppes 1962), l'autre pour les modèles de théories. En logique moderne, on identifie en effet un modèle à une structure d'interprétation qui rend les énoncés d'une théorie vraie. Et la théorie est alors l'ensemble d'énoncés (clos par

déduction) établis en un langage formel. Le modèle définira alors ce que la théorie représente.

L'intérêt épistémologique des modèles dans la pratique scientifique réside dans le fait qu'ils permettent de révéler des propriétés qui vont au-delà de celles explicitement modélisées. Ils rendent possibles la formulation rigoureuse de questionnements ontologiques. De plus, leur constitution à partir d'un mixte d'éléments se référant à des disciplines scientifiques, des techniques diversifiées, procède d'une pluridisciplinarité en acte. Dans un certain sens encore, les modèles sont des outils révélant les relations causales liant certains faits ou processus. Cartwright utilise d'ailleurs le terme de simulacre d'explication pour le terme modèle. Le modèle est alors l'explication que nous cherchons.⁴⁴⁸

On apprend donc avec les modèles par l'association de dénotation, démonstration, interprétation : dénotation à travers la relation de représentation entre le modèle et la réalité à modéliser ; démonstration dans l'exploitation du modèle aux fins de connaissance (on apprend quelque chose de nouveau à partir du modèle) ; interprétation pour rendre compte de ce que cela signifie pour l'objet modélisé. Modéliser participe alors d'un art, car il n'y a pas de recette prédéfinie permettant de réaliser le modèle. La modélisation apporte par la démarche de constitution ainsi que par la manipulation du modèle une nouvelle connaissance. Dans cette perspective le développement de la connaissance résulte du croisement réussi de deux démarches dans le cas des modèles fictionnels : celle de leur construction et celle de leur manipulation. (Les modèles matériels ne permettent généralement pas de distinguer ces deux moments de développement de la connaissance).

Ce qui nous intéresse est de savoir ce que révèle le modèle sur la réalité qu'elle est censée modéliser. Le transfert des connaissances acquises en connaissance du phénomène à modéliser vers une meilleure compréhension est une question importante. Implicitement ou explicitement, ce transfert repose sur l'affirmation que le modèle représente une partie

⁴⁴⁸ A propos des modèles à valeur explicative: Elgin, M. and E. Sober E.; Cartwright on explanation and idealization. *Erkenntnis* 2002,57: 441-450

de la réalité.

Les modèles sont donc des agents de connaissance, autonomes du point de vue de leur élaboration et du point de vue de leur fonctionnement. Ils peuvent être vus comme complément de théories dans le sens où la théorie n'impose que des contraintes générales et ne spécifie qu'incomplètement le sens imposé par ces contraintes. Il en est ainsi quand une théorie qualitative est complétée par un modèle quantitatif. (Ex. : théorie axiomatique du champ quantique). Mais Nancy Cartwright (1983) affirme qu'il s'agit là d'un cas bien plus général. Les théories fondamentales de la mécanique classique, de la mécanique quantique ne représentent rien et ne décrivent aucune situation réelle du monde. Le modèle intervient alors comme un moment de concrétisation de schèmes théoriques qu'il nourrit par les détails d'une situation spécifique. Les modèles sont également une aide à la théorie quand celle-ci est trop complexe à manipuler ou encore quand aucune théorie n'est disponible comme en biologie. Il s'agit alors de modèles de substitution à la théorie. Cependant, même dans ce cas on peut être conduit à utiliser des lois scientifiques qui gouvernent les entités et les processus élémentaires sous-jacents à l'objet à modéliser.

Le recours aux modèles nourrit un débat entre réalistes et antiréalistes. D'un côté la pratique des modèles conforte des positions antiréalistes. L'adéquation avec la réalité, la vérité, ne serait pas le but principal poursuivi par les modèles scientifiques, les bons modèles étant (ou pouvant) de ce point de vue être faux.⁴⁴⁹ Par ailleurs de nombreux modèles sont incompatibles alors qu'ils se réfèrent au même système cible. Ces positions sont réfutées par les réalistes, un modèle devant être au moins approximativement vrai et devenant de plus en plus vrai dès lors qu'on le dés-idéalise. Ainsi Rueger (2005) défend une perspective réaliste,⁴⁵⁰ chaque modèle d'une même cible pouvant révéler une facette des phénomènes modélisés.

S'agissant de la vie, du vivant, les trois modèles analysés dans les parties précédentes illustrent cette diversité. Ils restituent trois facettes différentes et

⁴⁴⁹ Nancy Cartwright (1983 chap.8) montre par exemple que le bon modèle de laser est finalement faux alors que les théories « vraies » n'aident pas à expliquer son fonctionnement.

⁴⁵⁰ Rueger A., *Perspectival Models and Theory*. *British Journal for the Philosophy of Science*, 2005, 56

complémentaires du phénomène vital. Entre l'approche de Rosen qui cerne la différence ultime entre système vivant et le paradigme machiniste, l'élaboration d'un système formel reproduisant les caractéristiques essentielles de la vie autour d'un automate fluide (le *Chemoton*) et la caractérisation d'associations de matière aptes à évoluer vers la vie telle que nous la connaissons, ce sont trois manières, trois styles, trois finalités de modélisation qui sont mis en scène.

Partant du plus abstrait, du plus dé-corrélé de la matière à celui qui finalement en épouse le plus étroitement celle qui se rencontre dans le vivant actuel, en passant par la construction d'un automate élaboré autour d'une chimie abstraite, ce sont finalement plusieurs niveaux d'abstraction qui sont tour à tour mobilisés pour cerner ce qui constitue le caractère propre, intrinsèque, d'une organisation matérielle originale, particulière, exprimant des propriétés vitales.

Peut-on d'ailleurs employer le terme de modèle pour toutes ces approches ? Rosen le revendique pour désigner ce qui est modèle de l'organisme en se référant à ce qui, selon lui, relève de la pratique constante des sciences comme recherche des rapports entre déterminations causales des systèmes naturels et déterminations syntactiques d'un système formel. (Voir chapitre 3.1). La démarche relève à la fois d'un but et d'une méthode: « ...nous allons voir que le concept de modèle fournit en fait une méthode générale pour comparer des structures de détermination de toute nature ». ⁴⁵¹ La démarche de modélisation participe donc de la théorisation des phénomènes de la nature. Chez Rosen, cette démarche rend concrète l'incorporation des lois de la nature dans un système formel. Elle associe deux facettes qui mettent en jeu le sujet conscient et son environnement : d'abord comme succession d'évènements ou de phénomènes non totalement arbitraires, manifestation de relations causales dans le monde phénoménal ; mais également à travers les relations théorisées entre phénomènes comme manifestation des capacités du système cognitif à les percevoir comme telles. Et s'agissant des organismes caractérisés par le modèle « M,R », ce que Rosen vise c'est l'établissement du principe théorique fondateur

⁴⁵¹ Rosen Robert: *Life Itself*, p 58 traduction libre de : « ...we shall see that the concept of a model provides in fact a general method for comparing entailment structures of any kind. »

de la compréhension de toute vie.

Les deux autres approches, celles développées par Gánti et Eigen, relèvent d'une démarche modélisatrice plus classique si on peut dire. C'est celle de l'élaboration d'un objet concret, c'est à dire d'un dispositif qui n'est certes pas matériel comme le serait une maquette, un modèle réduit, mais qui obéissant à des spécifications précises traduit dans un support formel adéquat, la stœchiométrie de relations chimiques entre trois sous-systèmes, les cinétiques de formation destruction chez Eigen, rendant ainsi possible des manipulations, des expérimentations via des simulations informatiques. Néanmoins, au-delà de cette communauté méthodologique, les différences entre les deux approches sont intéressantes.

La première, tout en visant un objet conçu en partant de savoirs théorisés et mis en forme par la biologie autour du concept d'organisme vivant élémentaire, comme système unitaire exhibant des propriétés vitales sélectionnées (la vie « absolue »), construit un objet théorique mélangeant différentes ressources théoriques en mobilisant deux familles d'approches : l'une issue de la cybernétique autour du concept d'automate fluide, l'autre, empruntant à une chimie abstraite à partir des composés réels du vivant actuel convergera avec la précédente pour spécifier un super système autorégulé reposant sur la connexion nécessaire (les relations stœchiométriques) de trois sous-systèmes, trois cycles auto catalytiques. Notons qu'il s'agit d'une reconstruction du réel qui ne procède pas uniquement de sa simplification par abstraction, mais de l'élaboration d'un nouvel objet d'étude obtenue par déformation (partielle) de la réalité saisie par les sciences de la vie : système de régulation, couplage stœchiométrique etc.

La deuxième approche, tout en se déployant au ras même de la matière organique constitutive du vivant, la dépouille pour ainsi dire de sa complexité originelle en se centrant sur deux natures de molécules organiques (Un porteur d'information et un catalyseur), et converge vers la mise en scène des propriétés duales des ARN. Ce parti pris permet alors de cerner à chaque fois les conditions de possibilité de franchissement d'une nouvelle étape sur le chemin de la vie. Les modèles formels (stabilisation de cycles auto catalytiques en quasi espèces et hyper cycles stabilisant la coopération de deux espèces moléculaires) sont là pour animer une histoire, pour identifier des conditions de passage vers des organisations matérielles proches des organisations vivantes connues. Et dans cette démarche, les connaissances empiriques, expérimentales (météorite de Murchinson, chimie prébiotique expérimentale, biologie moléculaire etc.), la thermodynamique, la

chimie, etc. sont systématiquement mobilisées et mises en forme pour construire l'histoire évolutive de la matière qui, partant d'une sorte de « soupe » pré biotique, évolue vers la première cellule vivante. Les deux étapes de modélisation reposent sur l'invention d'un mécanisme susceptible d'animer la matière, la canaliser et faire émerger une association singulière porteuse d'un potentiel d'évolution vers la vie.

Sur un plan épistémique, le modèle « M,R » caractérise une rupture par un mode d'organisation propre au sein des systèmes matériels, entre organismes et systèmes matériels non « organiques ». Le *chemoton*, tout en permettant de concevoir des formes organisées prébiotiques, signe également une rupture, dans une continuité organisationnelle, en imposant l'union nécessaire de trois systèmes. Enfin le modèle historique parce qu'il introduit une continuité, certes marquée par des ruptures, des changements qualitatifs, ne permet pas dans un premier temps de penser la vie, le vivant comme quelque chose d'essentiellement différent d'autres formes d'organisations matérielles.

Le tableau ci-après résume les principaux enseignements tirés de l'étude de ces modèles.

	Rosen : Modèle MR	Gánti : Modèle du <i>chemoton</i>	Eigen/Schuster : Modèle de système « darwinien »
Typologie du modèle.	Aristotélien : simplification par abstraction radicale.	Galiléen : simplification et distorsion par rapport à la réalité biologique	Aristotélien : simplification par réduction des natures chimiques en jeu.
Fondements théoriques.	Topologique, permettant de définir un organisme comme un tout. Biologie relationnelle	Cybernétique, autocatalyse, chimie.	Chimie des systèmes réplicatifs, catalyse, théorie des systèmes non linéaires.
Adhérence du système modélisé à son substrat matériel	Matière radicalement abstraite au profit de l'idéalisation des contraintes fondamentales de l'organisme.	Abstraction à partir d'une chimie « réelle » visant à idéaliser les trois fonctions essentielles du vivant élémentaire.	Modèle élaboré à partir des propriétés des matériaux macromoléculaires identifiés par la biologie moléculaire.
Apport théorique	Différenciation fondamentale entre système mécanique (machine) et organisme.	Union fonctionnelle nécessaire de trois sous-systèmes. Concept de vivant élémentaire (« atome » de vie).	Systèmes matériels « darwiniens ». Stabilisation dynamique dans le jeu des interactions catalyseurs/réplicateurs.
Explication(1) : « pourquoi une chose est-elle vivante » ?	Est vivant tout système matériel qui est un organisme = clos sur la cause efficiente.	Est vivant tout système matériel formé de l'union de trois sous-systèmes (selon le modèle du <i>chemoton</i>)	Pas de définition explicite de la vie...mais celle d'un système matériel capable d'évolutions

		Rosen : Modèle MR	Gánti : Modèle du <i>chemoton</i>	Eigen/Schuster : Modèle de système « darwinien »
	Explication(2) : « comment une chose est-elle vivante »	Emergence forte.	Lié à un processus de formation de trois sous-systèmes à partir de réactions chimiques, puis union, couplage de ces trois sous systèmes	A partir de la formation d'un noyau élémentaire répliatif, engagement dans une évolution faite de stabilités relatives et de ruptures
	Définition de la vie	Rupture dans l'organisation des systèmes matériels. (agencement des relations matérielles)	Changement qualitatif résultant du fonctionnement « de concert » de trois sous systèmes	Intégration d'un potentiel d'évolution dans un système matériel.
	Perspectives thématiques.	Caractérisation d'une différence avec la physique « commune »	Machine chimique produisant les éléments de son organisation. (autopoïèse)	Chimie particulière liée aux propriétés de systèmes répliatifs.

Enseignements tirés des modèles

3.4.2 Modèles du vivant et définitions de la vie

Nous avons abordés avec l'examen des démarches concrètes de définitions de la vie, du vivant, les difficultés d'élaboration d'une définition scientifique caractérisant de façon univoque l'objet d'étude des sciences de la vie. Le foisonnement des approches, s'il traduit une grande richesse de préoccupations tant théorique que pratiques, et pour faire court, s'il exprime une sorte de pluridisciplinarité de fait autour d'interrogations sur la vie, est également révélateur de limites. Ces limites nous avons tenté de les cerner dans la première partie. Elles plongent leurs racines dans la longue histoire de la pensée qui, structurée par des thèmes récurrents autour de l'essence du vivant, de la vie, ou encore par les pesanteurs historiques découlant de la constitution des différentes disciplines scientifiques, forme la trame des interrogations sur le vivant (partie II). Explorer alors l'apport de modèles, que nous avons qualifiés de globaux au regard de l'ambition affichée par leurs inventeurs, permet de saisir ce qui sur le plan fondamental autorise à attribuer la qualité de vivant à un objet matériel.

En repartant de la remarque de Christian de Duve⁴⁵² sur la vie comme « ce qui est

⁴⁵² de Duve Christian, *A l'écoute du vivant*. 2005, déjà cité.

commun à tous les êtres vivants», il conviendrait d'extraire ou abstraire les caractéristiques communes à toutes les formes de vie pour pouvoir définir le vivant. Ainsi, si la vie c'est les *eubactéries*, les *archea*, les *eucaryotes*, etc., ce que l'on identifie ce sont des propriétés communes, des caractères qui se répètent dans toutes les formes de vie rencontrées sur terre. Cette abstraction conduit à livrer un ensemble de propriétés, de caractéristiques communes à toutes les formes de vie sans que l'on puisse d'ailleurs en identifier une, singulière et exclusive qui les résumerait toutes. La réplication macromoléculaire n'est pas la caractéristique des seuls être vivants, ni ne l'est la présence d'un système de transformation d'énergie via un réseau auto-catalytique, comme ne l'est pas non plus la seule présence de membranes isolant un espace dans l'environnement. Dans cet ordre d'idée, la direction indiquée par Oparin⁴⁵³ reste fructueuse. Dans son texte de 1924, Oparin proposait une liste des caractéristiques du vivant pour conclure que ce qui est propre au vivant c'est sa capacité à les réunir dans un même objet. La définition de la vie n'est donc plus à chercher dans des caractères propres, mais dans la réunion, le couplage, la coopération d'un ensemble de caractéristiques identifiées par l'analyse des formes actuelles de vie ainsi que dans ce qui rend possible ce couplage. C'est précisément le champ de préoccupations couverts par les modèles analysés.

L'approche modélisatrice permet tout d'abord de mettre entre parenthèses, ou de prendre de la distance par rapport aux conceptions et aux définitions de la vie empruntées au langage commun en ne se contentant pas de reproduire la phénoménologie des vivants actuels. En effet si, et cela quelles que soient les approches, définir un objet participe toujours d'un rapport entre ce qu'on dit et ce qu'on montre,⁴⁵⁴ la proximité de ce que l'on veut définir avec le vécu propre de chaque observateur, constitue ce rapport comme un prolongement de son être propre et rend l'opération d'objectivation délicate. Car *nolens volens* c'est sa propre expérience de vie qui a tendance à y figurer pour brouiller le travail d'identification et d'énonciation des conditions nécessaire et suffisantes afin que les

⁴⁵³ A. I. Oparin. *The origin of life*. Déjà cité.

⁴⁵⁴ L'idée sur ce point consiste à exploiter l'approche de Wittgenstein à propos du sens d'un mot, à la fois dans l'action de désignation (ostentation) de ce qui est vivant et la constitution d'un jeu de langage autour des objets vivants à partir de l'expérience de vie subjective et intersubjective. Voir à ce sujet Wittgenstein L. *Le Cahier bleu et le Cahier brun*. Tel Gallimard, 1996

choses tombent sous un concept univoque de vie. Au mieux, ce rapport lâche, mobile, fluctuant pourra-t-il livrer l'impression que l'objet concret visé par l'observateur participe d'un air de famille commun. A contrario, le modèle global du vivant crée l'objet conformément à un concept déterminé de vie, dans une relation établissant la condition nécessaire et suffisante pour qu'un objet matériel puisse être qualifié de vivant. On notera cependant que sous ce rapport la démarche développée par Eigen et Schuster paraîtra moins nette et tranchée que celle de Rosen ou Gánti.

De plus, la création du modèle dans la nécessaire démarche de sa constitution, règle, ou met au clair un autre des problèmes liés à la définition de la vie. Sa construction explicite et coordonne en effet les convergences théoriques nécessaires à sa constitution. Ce qui, dans une définition littérale, relevait d'une sorte de coloration de langage renvoyant aux champs théoriques de la thermodynamique, de la complexité, de la cybernétique, de la chimie, de la physique des points matériels etc. est ici assumé, revendiqué, explicité comme un matériau nécessaire à l'élaboration du modèle. Celui-ci, dès lors, s'offre à l'examen non ambigu de l'observateur, à la fois comme reconstitution d'une définition du vivant abolissant tout flou, tout à-peu-près dans son expression, et comme objet théorique concret ouvert à des investigations ultérieures.

Cependant ces modèles/définitions visent également un objet « réel » et introduisent une tentation « essentialiste » qui renvoie à un problème : comment rendre compte de cette « essence » sur le plan matériel sans recourir à une forme ou une autre du « vitalisme » (par ex. sous forme de lois propres, « bio toniques » pour reprendre le vocabulaire de Walter Elsasser⁴⁵⁵). La solution, si on peut dire, c'est le déplacement des questions d'ontologie de la substance vers celles des relations, une ontologie relationnelle préservant la communauté matérielle du vivant et du non vivant sur le plan de ses éléments constitutifs, tout en mettant l'accent sur une qualité organisationnelle propre, spécifique, singulière qui ferait du vivant une organisation matérielle pas tout à fait identique à un cristal, une flamme, un verre, etc...

⁴⁵⁵ Voir à ce sujet un exposé et une analyse critique par Gatherer Derek. Finite Universe of Discourse: The Systems Biology of Walter Elsasser (1904-1991). *The Open Biology Journal*, 2008, 1, 9-20

Au-delà des différences liées tant aux parti pris de modélisation qu'aux cultures scientifiques des différents auteurs, se dégage un fond commun. Ainsi, si l'accent mis sur ce qui différencie une structure matérielle dotée de propriétés remarquables du reste de son environnement matériel reste propre à chaque démarche modélisatrice et relève d'une priorité de théorisation, l'importance fondamentale de relations qui contraignent les rapports entre éléments matériels est commune à ces trois approches. Ces relations de contraintes qui les constituent comme un tout rend ainsi possible l'expression de phénoménalités nouvelles, celles d'un ensemble matériel doté de capacités lui permettant de se singulariser, se différencier dans l'environnement matériel dans lequel il reste nécessairement plongé, capacités que par convention on appelle la vie. C'est un propre du vivant qui se donne alors comme une propriété essentielle construite dans le jeu complexe des interactions.

Ainsi en lui conférant un support théorique (les modèles), le propre du vivant sera déclinable selon trois facettes différentes et complémentaires :

- La vie est la propriété d'une structure matérielle, l'organisme, radicalement différente sur le plan fondamental de l'organisation matérielle du restant des systèmes qui relèvent peu ou prou de systèmes mécaniques (Machine *versus* non machine). L'essence du vivant est saisie dans sa différence fondamentale par rapport à d'autres types d'organisation à travers le concept de la « clôture sur cause efficiente ».

- La vie est la propriété d'une organisation spécifique de systèmes matériels, associant nécessairement trois fonctions incarnées dans trois sous systèmes différents. Cette organisation crée les conditions de possibilité de formation d'unités intrinsèques, qui par différenciation évolutive peuvent acquérir les propriétés attribuées au vivant actuel.

- La vie, c'est un ensemble de caractéristiques pouvant s'acquérir progressivement à travers l'évolution d'un système matériel. Ce système matériel élémentaire est le fruit d'une nucléation dont la probabilité est compatible avec l'histoire géologique de la terre. La vie ne se donne plus d'emblée comme une propriété unique, unifiée autour d'une structure matérielle, mais progressivement, comme potentialité en devenir. La structure minimale porteuse de ce potentiel d'évolution disposera d'emblée de la capacité à s'inscrire dans une trajectoire menant vers le vivant tel que nous le connaissons grâce à une relation de coopération nécessaire entre deux types d'éléments matériels. En somme, une vie en puissance qui s'actualise dans un rapport à l'environnement l'inscrivant dans

une trajectoire temporelle.

Ce qui est également commun aux trois modèles c'est donc la présence d'une matière qui dans son organisation élémentaire (atomes, molécules voire même certaines macromolécules) assure la continuité entre monde vivant et non vivant. Mais c'est aussi la mise en évidence d'un jeu entre ouverture et fermeture par rapport à l'environnement, garantissant pour l'entité matérielle modélisée tout à la fois son insertion et son autonomie relative. Ouverture et fermeture à travers le jeu entre causes matérielles procédant de l'environnement et clôture sur causes efficientes ; ouverture et fermeture encore à travers celle d'une membrane produite et régulant un ensemble conférant par-là même des statuts différents aux matériaux au sein et hors de l'ensemble organisé ; ouverture et fermeture enfin à travers les mécanismes de sélection chimique d'ensembles coopératifs. Et on retrouve explicitement ou implicitement la canalisation du jeu des lois physico-chimiques par une structure matérielle, une organisation spécifique de la matière.

La centralité d'interrogations tournant autour de l'organisme, de l'organisation, de l'association et la coopération constituant un « tout » indissociable pouvant évoluer sans perte des propriétés originelles est une autre constance de ces modèles. Les réponses aux interrogations portant sur la constitution de ce « tout » à travers une organisation spécifique qui n'est pas l'expression réduite de la juxtaposition d'éléments matériels séparés, mais celle de leur union nécessaire au sein de sous-ensembles indispensables à l'existence de l'entité globale et dont la raison même est liée à leur fonction à son service : fonctions de réparation, de réplifications... ; fonctions métaboliques, de régulation... ; porteurs d'informations, fonctions catalytiques...

Pour résumer, tous ces modèles mettent en perspective la permanence d'une structure matérielle à travers la constitution d'une unité intrinsèque. Ces ensembles matériels qui relèvent de cette mise en perspective, forment à travers les relations décrites précédemment un système qui différencie l'espace interne de l'environnement externe. C'est dans le modèle « M,R » le découplage des déterminations, ou chaînes causales de l'organisme par rapport aux déterminations externes ou chaînes causales propres aux phénomènes physiques de l'environnement. C'est également la constitution de l'unité intrinsèque grâce à la séparation physique ou membranaire déterminée par l'activité métabolique interne et celle de régulation qui conduit à la création d'un homéostat. C'est enfin encore, la dynamique d'interrelation entre deux polymères dont l'un, grâce à sa fonction enzymatique procure à l'ensemble une dynamique différente de celle des

associations aléatoires de son environnement immédiat, qui constitue l'unité intrinsèque.

Et se fait jour une double facette du vivant, comme entité singulière, comme unité de vie se différenciant structurellement des autres formes d'organisation matérielles, mais également entité manifestant des temporalités propres, différentes de celles concernant les éléments et phénomènes matériels de son environnement.

Reste à rendre compte du comment de l'avènement d'une telle singularité matérielle, de sa différenciation par rapport à la matière ordinaire (par opposition, non organisée sur le plan macroscopique).⁴⁵⁶ La conception de cette émergence s'inscrit dans un faisceau de contraintes théoriques et empiriques. En effet pour rester cohérent avec l'ensemble des sciences de la nature, l'explication de processus d'émergence de la vie doit s'inscrire dans l'histoire même de la terre, être compatible avec les principes physico-chimiques procédant des théories fondamentales de la matière,⁴⁵⁷ et pouvoir prendre appui sur les rares données observationnelles et expérimentales disponibles. Dans ces essais de théorisation des origines de la vie, de mise en cohérence d'ensemble d'hypothèses, le temps, la durée, jouera un rôle primordial. C'est en premier lieu, le temps comme cadre général permettant d'ordonner un scénario d'émergence qui tirerait son origine directement de la matière élémentaire pour mener au vivant tel que nous le connaissons. Mais le temps, avec la durée, constituera également la condition de possibilité de réalisation de certaines des étapes qui sont susceptibles de jalonner les différents processus d'émergence.

⁴⁵⁶ « La vie, ou plus exactement un organisme vivant, est donc une entité qui a une origine dans la matière qui devient vivante dès qu'elle se différencie de l'environnement ». Maurel Marie-Christine : *Origines de la vie, originalité du vivant*. Nouveaux débats sur le vivant, coordonnés par M.-C. Maurel et P.-A. Miquel, Editions Kimé, 2003.

⁴⁵⁷ L'unité sous-jacente aux diverses hypothèses relatives à l'origine de la vie, relève d'une « thèse de continuité ». Cette thèse est une condition nécessaire à toute approche scientifique dans ce domaine. Elle repose sur deux principes, celui de l'absence d'une solution de continuité entre matière inorganique et vie, et celui de considérer l'émergence de la vie comme un processus à probabilité élevé. Voir sur ce sujet: Fry Iris, Are the different hypotheses on the emergence of life as different as they seem? *Biology and Philosophy*. October 1995, Volume 10, Issue 4, pp 89-417.

3.4.3 Dynamiques temporelles, émergence de la vie

Dans cette perspective, les trois modèles contribuent de façon inégale à l'éclairage de la problématique de formation et d'évolution de structures matérielles vivantes. Ils sont supports d'épistémologies différenciées, notamment dans la prise en compte des variations de l'environnement matériel et dans la façon d'aborder la genèse de ces structures.

Avec le *chemoton* et le modèle développé par Eigen, le maintien dans la durée des principes fondamentaux organisant l'ensemble et rendant possible la survie du système vivant, se réalise à travers le succès reproductif du tout, dans des contextes évolutifs pour lesquels les normes de réaction du système matériel organisé ne sont pas totalement prédéfinies, mais également construits dans l'échange avec l'environnement (matière, énergie), par la variation des mécanismes de réplifications (copies non fidèles) et par la sélection des systèmes les plus performants (prolifération).

Par contre le modèle «M,R» de l'organisme, met l'accent sur la seule contrainte essentielle de coopération, sous l'approche de clôture sur «cause efficiente». Celle-ci introduit une contrainte forte, la nécessité pour tout organisme vivant d'être capable de produire et reproduire par sa propre dynamique de fonctionnement, les éléments, qui détermineront sa capacité à se maintenir en tant qu'organisme. En somme, dans cette perspective Rosen met alors l'évolution entre parenthèses, pour ne l'aborder que comme phénomène contingent.

Sur le plan de la compréhension du phénomène vivant, ce sont donc trois angles d'approches qu'il convient d'associer. C'est d'abord, nous venons de l'examiner, ce qui garantit dans la durée la permanence d'un certain type de rapport organisationnel. C'est également ce qui constitue le support de variations compatibles avec cette nécessaire permanence et qui permet alors de rendre compte de la diversification et de l'évolution des structures vivantes. Et c'est enfin, ce (mécanisme, processus) qui pourrait rendre compte de leur avènement (émergence).

La garantie de permanence est déclinée dans le *chemoton* sous forme du lien nécessaire entre trois sous-systèmes fonctionnels, contrainte forte spécifiée par une relation stœchiométrique. Cette relation constitue l'organisme vivant élémentaire à travers ses échanges et transformations énergétiques, par le fonctionnement d'un système de

régulation reposant sur un ensemble réplicatif au sein d'un espace géographique déterminé. Encadrée par cette permanence, c'est l'imperfection de la réplication des chaînes polymériques du système de régulation qui ouvre tout un espace de possibilités nouvelles autorisant les évolutions du système organisé au cours du temps et rendant possible diversifications, sélections adaptations à des environnements changeants.

L'originalité des modèles élaborés à partir d'un système coopératif associant deux types de polymères, l'un porteur d'information, l'autre assurant des propriétés fonctionnelles (catalyse de la réplication du porteur d'information et de synthèse de polypeptides) réside dans ce jeu de réciprocité qui assure dans le même rapport stabilisation et potentiel d'évolution. Chez Eigen et Schuster, permanence-stabilité et évolutivité sont intimement liées. Ce qu'on définit donc en même temps, c'est un système évolutif, une organisation matérielle qualifiée par les auteurs de « darwinienne ». On prend ainsi à bras le corps la dimension historique de la vie, en faisant de la capacité d'évoluer le moteur central permettant d'acquérir les fonctionnalités les plus complexes, par exemple l'acquisition d'une frontière physique stabilisant ce système coopératif. Chez Eigen et Schuster, il n'y a pas de définition explicite de la vie comme propriété d'une structure matérielle spécifique. Ce qui est modélisé, c'est le support matériel explicatif d'un processus historique, d'une histoire, qui serait celle d'une association, ou d'une coopération à bénéfice réciproque (enzyme et porteur d'information) traçant un chemin possible vers le vivant tel que nous le connaissons. Et cette histoire est intimement liée à la « matière » constituée à l'image de la physique et la chimie de notre monde.

Cet aspect renvoie finalement à l'apport des modèles aux théories d'émergence de la vie. La démarche précédente expose une approche qui inscrit la vie dans un processus graduel menant par degrés de la plus simple molécule organique vers la première cellule procaryote en passant par toutes les formes intermédiaires imaginées par la chimie prébiotique. C'est en somme un continuum qui est théorisé, analysable en degré de vie, dans lequel le hasard joue un rôle fondamental tout en étant contraint par des règles

générales de stabilisation dynamique.⁴⁵⁸ De même, à partir du *chemoton* ce sont des scénarii d'évolution pré biotique qui s'offrent à nous par combinaison des sous-systèmes entrant dans la constitution de ce super système⁴⁵⁹ : métabolisme ou membrane ou porteur d'information en premier, puis combinaison deux par deux pour aboutir à l'unité ternaire du *chemoton*. D'un continuum sans ruptures on passe à l'identification d'étapes ou de stades d'organisation de la matière, successifs ou conjoints, comme préalable nécessaire à la formation de l'unité élémentaire de vie.

A-t-on alors inventé la vie par degré⁴⁶⁰ ? On conjugue continuités et ruptures en une succession de séquences de changements qualitatifs au sein d'un continuum d'évolution. L'approche conduit à une vision plutôt gradualiste, faite d'étapes dont aucune prise isolément ne permet de dire que la structure matérielle en jeu serait totalement, partiellement, ou un peu vivante. Elle incite à jeter un regard différent sur le monde prébiotique, dans lequel on ne guettera plus une apparition, mais dans lequel on tentera d'identifier les conditions et les modalités de réalisation (émergence) d'organisations capables de se développer en interaction avec leur environnement. Ce que l'on recherchera alors, c'est expliquer les processus coopératifs de couplages permettant de faire émerger une structure auto-poïétique complète. Et dès lors il ne s'agira plus de définir le moment d'une transition vers la vie, de son apparition, mais d'identifier des cheminements possibles vers le monde que nous connaissons.

Cette mise en mouvement de la matière opère selon une trajectoire temporelle construite à travers le filtre d'une sélection naturelle réinterprétée pour la rendre applicable au niveau moléculaire. La durée rend possible l'exercice de phénomènes antagonistes, répliquations, erreurs ; la sélection des formes organisées les plus stables en construit le sens, une orientation qui fait émerger progressivement des formes

⁴⁵⁸ Cet aspect a d'ailleurs fait l'objet d'une théorisation sous le concept de « dynamic kinetic stability » par Addy Pross. Voir Pross Addy, Toward a general theory of evolution: Extending Darwinian theory to inanimate matter. *Journal of Systems Chemistry* 2011, 2:1 <http://www.jsystchem.com/content/2/1/1>

⁴⁵⁹ Griesemer James. *Chemoton models and origins-of-life scenarios: A reproducer perspective*. Université Paris, IHPST (Institut d'histoire et de philosophie des sciences et des techniques), Paris France, October 24, 2011.

⁴⁶⁰ Malaterre Christophe. On What It is to Fly Can Tell Us Something About What It is to Live. Déjà cité. Malaterre Christophe. Lifeness signatures and the roots of the tree of life. *Biology & Philosophy*, September 2010, volume 25, issue 4.

d'organisation de matière interdépendante de plus en plus complexe.

Mais l'approche qui engloberait dans une même vision d'ensemble toute l'évolution de la matière vers le vivant tel que nous le connaissons reste délicate et complexe à formuler. Il s'agirait en effet de pouvoir ajuster deux histoires évolutives, celle de la matière pré biotique et celle de la matière « vivante ». Et dès lors un problème est à prendre en compte, celui de l'articulation entre deux types de champs disciplinaires et théoriques. Ce serait pouvoir articuler le champ de la physico-chimie de la matière pré biotique et celui de la biologie et dans le même mouvement, celui de toutes les disciplines qui concourent à fournir des éclairages pertinents sur le vivant actuel. Cette articulation aurait comme corollaire la nécessité non seulement d'élaborer des mécanismes, des processus organisant le passage entre ces deux mondes, mais également d'établir les articulations conceptuelles permettant de rendre compte des concepts du champ émergent, la biologie, à partir de ceux théorisant la matière non organisée. Il s'agirait en somme de pouvoir rendre compte d'une sorte de « *jannus* »⁴⁶¹ théorique, dont l'une des faces est nécessairement orientée vers le corpus de la physique et de la chimie « telle que nous la pratiquons », alors que l'autre doit rester ouverte au « vivant tel que nous le connaissons ».

Finalement, comment doit-on penser l'insertion d'une structure matérielle dans la durée ? Il est nécessaire de la caractériser théoriquement sur deux plans, sa capacité à se maintenir, notamment en préservant une forme de clôture organisationnelle telle que présentée, tout en disposant du potentiel d'évolution lui conférant le statut d'objet d'histoire. Ce potentiel d'évolution comment de caractériser ? On dispose des théories d'évolution des systèmes vivants, de l'identification de mécanismes présidant à la capacité des vivants actuels à évoluer sous pression de sélection par le jeu des variations aléatoires se produisant lors de leur reproduction et modifiant leurs capacités adaptatives. Cette capacité est bien évidemment centrale et intrinsèque aux systèmes vivants, comme est centrale l'organisation matérielle générale garantissant la permanence d'une certaine

⁴⁶¹ Dieu latin du « passage » : dans l'espace, dans le temps, dans l'être comme passage du néant à la vie.

relation entre composants d'un organisme soumis à de multiples contraintes, variant dans la durée. Objet d'une histoire, le vivant n'est-il pas de ce fait également sujet de son l'histoire ?

Le rapport du vivant à la durée renvoie donc à une forme de permanence, comme étant ce qui permet à la structure matérielle de continuer à exhiber des propriétés subsumables sous le terme de vie. En développant un concept de « vie comme adaptation souple », ⁴⁶² Bedau présentait le maintien de l'identité d'une organisation échangeant matériaux et énergie avec l'environnement comme étant ce qui caractérise sur un plan fondamental le vivant, au-delà même de l'extrême diversité de ses manifestations. Et parmi l'une de ces propriétés, il est tentant d'intégrer la capacité à évoluer, à se diversifier sous l'effet des contraintes environnementales qui, parce qu'elles s'exercent sur des entités générant leur propre variabilité (selon des modalités encore en débat autour des unités de sélection) créent les conditions d'une pression de sélection.

3.4.4 Conclusion de cette partie : la singularité du vivant.

Ces modèles caractérisent, avec leurs moyens propres, la singularité d'un objet matériel dont la permanence organisationnelle, sur le plan de la structure fondamentale, constitue également la condition de possibilité de son évolution en tant qu'entité dans un cycle de croissance et de multiplication, mais aussi et surtout évolution collective de toute une population en interaction permanente. Cette population se différencie progressivement sous l'effet de variations aléatoires inscrites dans ses mécanismes de duplication, répliques, reproductions par lesquels un ensemble d'unités élémentaires dotées de propriétés intrinsèques s'ouvre à des perspectives de sélections différenciées. Cette caractérisation d'un objet associe étroitement permanence, celle de l'organisation garant de sa continuité matérielle, avec une dynamique de différenciation support de son potentiel évolutif. Cette dualité pose bien évidemment problème à l'unification des approches scientifiques tant elle joue sur ces deux facettes : permanence, stabilité des formes et en même temps mobilité, variabilité, différenciation sous l'effet de la durée sans

⁴⁶² Bedau Mark A., *The Nature of Life*. The philosophy of artificial Life. Déjà cité.

que l'on puisse inférer le résultat de cette dernière à partir de l'analyse de la première.

Mais énoncer une propriété essentielle dans le sens où elle constituerait le propre d'une structure matérielle, nécessite de pouvoir rendre compte de son avènement : mécanismes d'évolution pré-biotique, identification ou plutôt invention des conditions nécessaires, voire suffisantes, poids des phénomènes stochastiques, pour qu'un dispositif matériel puisse manifester des propriétés intéressantes soit dans sa capacité à entrer dans un processus « darwinien » pour reprendre le vocabulaire d'Eigen, ou encore plus précisément en désignant la nature du changement qualitatif d'organisation auquel cette entité matérielle doit satisfaire pour acquérir une propriété organisationnelle essentielle : relation nécessaire et intime de trois fonctions (métabolisme, régulation, clôture) , clôture d'une forme de causalité.

Les modèles étudiés négocient différemment ce double aspect. Si Rosen privilégie un modèle atemporel, c'est pour mettre l'accent sur ce qui assure la permanence topologique de l'organisme. Le modèle de l'hypercycle, tout en étant également centré sur ce qui assure la stabilisation d'un ensemble coopératif de molécules organiques, lie cette permanence directement aux capacités évolutives de ces ensembles en en définissant les conditions de stabilisation. Dans ce cas, les lois de l'évolution des sciences de la vie sont réduites aux dynamiques de stabilisation d'ensembles comme produit d'équilibre entre les cinétiques réactionnelles et la qualité des réplifications. Le *chemoton* réalise une sorte de synthèse en spécifiant les conditions de clôture et en réintroduisant un potentiel d'évolution par la simulation du modèles à partir de système chimiques proches de ceux rencontrés dans les vivants actuels, notamment les réplifications avec erreur, l'introduction de séquences réplificatives significantes, les évolutions du *chemoton* primitif permettant d'acquérir ainsi des fonctions catalytiques spécifiques etc.

Mais dans tous les cas, c'est l'incarnation dans une matière réelle, notamment celle permettant de disposer de systèmes auto réplificatifs décrits par la biochimie, qui garantit ou permet au système vivant d'acquérir cette propriété d'évolution souple et sans limite

Les Modèles du Vivant :

dont parle Bedau⁴⁶³. C'est le jeu de la matière réelle qui assure la variabilité de l'ensemble et c'est le jeu des clôtures qui en assure la permanence.

⁴⁶³ Bedau Mark A., Four Puzzles about Life. *Artificial Life*, 1998,125-140

Conclusion

Notre enquête nous a conduit tour à tour à examiner les enjeux scientifiques liés à la caractérisation de la vie, du vivant à travers ses définitions ; à repérer les trames d'interrogation du propre du vivant dans l'histoire de la pensée ; et pour clore cette revue, à analyser des approches de modélisation globale. Ces dernières nous ont paru particulièrement fascinantes, car porteuses d'une possibilité de dépassement des apories introduites dans la première partie, tout en retrouvant dans leurs parti pris de théorisation, quelques-unes des interrogations identifiées dans la deuxième partie. Quel bilan pouvons-nous alors en tirer avant de clore (provisoirement) cette enquête ?

Ce qui pour nous ressort comme trait marquant de cette revue et qui a posé problème dans l'affirmation de la reconnaissance de la singularité du vivant, c'est sa matérialité, c'est à dire, l'inscription des propriétés vitales dans son organisation matérielle, dans les rapports constants qui se nouent entre les différentes composantes matérielles constituant l'organisme vivant ainsi que dans les relations qui constituent cette structure matérielle au sein de son environnement. Finalement la vie n'est que le résumé de propriétés structurelles ou de regroupements matériels. L'affirmation de la matérialité de ce qui permet d'exprimer la vie, comme étant l'ensemble des propriétés possédées par un système organisé de manière appropriée, est le fil conducteur qui a donné son sens à cette investigation. C'est en effet, l'examen de la vie comme propriété d'une organisation matérielle, comme effet d'une disposition de la matière, qui a permis d'ordonner notre questionnement, qui a révélé la richesse des interrogations sur la spécificité ou la singularité du vivant au regard d'autres formations matérielles du monde.

Et ce qui apparaît tout au long de cette enquête, c'est la difficulté à saisir et à caractériser simplement l'originalité du vivant, ce qui permettrait de le définir par rapport au restant du monde non vivant au sein d'un cadre théorique unique. Car ce qui se joue constamment c'est pouvoir penser dans des approches théoriques communes à l'inanimé et à l'animé ce qui, au-delà des nécessaires descriptions phénoménologiques, peu ou prou marquées par notre propre vécu d'être vivant, constitue la singularité de tous les êtres vivants. Celle-ci se décline dans leur manifestation contemporaine : le vivant « tel que nous le connaissons », et l'enjeu est alors la caractérisation de ce qui détermine

précisément cet objet matériel à recevoir le qualificatif de vivant. Elle se décline aussi à travers son histoire remontant à sa genèse, c'est-à-dire dans ces processus eux même singuliers qui ont conduit à la formation des vivants originaires. La singularité du vivant doit donc pouvoir être caractérisée à la fois sur les plans synchronique et diachronique.

L'une des pierres de touche de tout travail visant à saisir cette singularité réside donc nécessairement dans l'explication de l'avènement du vivant. Dans toute invention de processus, dans ce qui dans l'état actuel de nos connaissances relève nécessairement de spéculations proposant des voies menant à la formation du vivant « tel que nous le connaissons », il nous semble nécessaire de pouvoir caractériser une rupture ou du moins un changement de qualité d'un système matériel au sein d'une évolution continue. Ce serait celui porté et inscrit dans les propositions multiples et répétées de définition de la vie, du vivant, dans le cadre de la permanence des principes physiques et chimiques fondamentaux de la nature.⁴⁶⁴ Car la formation, la constitution, la genèse de cette singularité doit nécessairement être sinon retrouvée, mais tout au moins faire l'objet de conjectures compatibles avec l'ensemble des données observationnelles et des théories scientifiques disponibles.⁴⁶⁵

En découle une autre exigence, comme une sorte de corollaire des considérations précédentes. Elle se traduit par la nécessité d'intégrer la dimension historique dans la détermination de l'objet vivant. Car il est tout à la fois nécessaire de rendre compte de la permanence d'une structure d'organisation fondamentale et de sa capacité à en assurer l'actualisation constante et continue tout au long d'une histoire qui a conduit d'abord une

⁴⁶⁴ Nous avons déjà commenté ce principe constitutif à toute démarche scientifique d'émergence de la vie. Cette citation nous paraît de ce point de vue emblématique: «...*despite this pronounced division, there is a most basic common denominator which binds together all researchers of the emergence of life. This common element, which I will coin "the continuity thesis", is the assumption that there is no unbridgeable gap between inorganic matter and living systems, and that under suitable physical conditions the emergence of life is highly probable.* » Fry Iris, Are the different Hypotheses on the Emergence of Life as different as they seem? *Biology and Philosophy*, 1995, 10 : 389-417

⁴⁶⁵ Il s'agirait de mettre en application un principe aménagé de « l'inférence à la meilleure explication » tel que développé par Peter Lipton. Il est en effet clair que la possibilité de reconstituer directement l'histoire de cette transition est obérée par la faiblesse des traces laissées. Ténues, labiles, elles imposent la convergence de toutes les disciplines scientifiques autour de la reconstitution d'une histoire compatible et cohérente avec les corpus scientifiques concernés. Et ce n'est qu'à ce prix que pourrait-être proposé un scénario vraisemblable d'émergence de la vie. Pour ce qui concerne l'exposé détaillé du principe « d'inférence à la meilleure explication » voir : Lipton Peter. *Inference to the best explanation*. Second Edition. London, *Routledge*, 2004

collection de polymères aux propriétés remarquables du stade de « chaos » moléculaire, vers celui d'un collectif organisé, pour finalement rejoindre par évolution le vivant tel que nous l'appréhendons, le décrivons et tentons de le définir.

Ce qui ressort de la première partie, à travers l'analyse des définitions du vivant, l'enjeu étant de passer d'une définition courante de la vie à une définition scientifique, c'est que la variété des définitions est moins le reflet d'une impuissance que celui de points de vue différents à même de caractériser la spécificité de l'organisation matérielle vivante. C'est la multiplicité des points de vue théoriques et pratiques, des angles d'approches, des profondeurs d'analyses qui sont finalement reflétés dans le kaléidoscope définitionnel.

Ces approches différenciées, exposant des « points de vues » d'une même réalité difficile à saisir dans une démarche unique, délicate à cerner, se constituent à partir de la mobilisation de différentes positions théoriques permettant de mettre l'accent sur tel ou tel aspect de la phénoménologie vivante : physique, chimie etc. Mais bien évidemment, les sciences de la vie, dans leurs apports théoriques et expérimentaux constituent l'approche centrale de l'histoire naturelle du vivant. Leurs apports en tant que discipline qui, par vocation même, explore la phénoménologie (les propriétés) du vivant et qui en tant qu'ils ont réussi une application originale, effective de la chimie (bio chimie) avec la mise en évidence des mécanismes moléculaires en jeu au sein de la cellule vivante, ainsi que par la réappropriation des fondements de la physique et de la chimie, sont essentiels. La théorie de l'évolution en constitue par ailleurs l'ossature apportant la cohérence à un édifice constitué autour d'une étonnante diversité.

L'ensemble des disciplines mobilisées pour irriguer les démarches de compréhension de la vie et rendre compte du vivant avec leurs accents propres, a conduit à l'élaboration de listes étendues de propriétés de la vie ou du vivant. Celles-ci, plus ou moins ordonnées et hiérarchisées préfigurent ainsi des liens causaux entre propriétés fondamentales et propriétés subséquentes (voir partie I), résumant en somme un état d'avancement des sciences de la vie. Ces définitions, qualifiées de définitions listes, sont complétées ou mises en perspectives par celles qui mettent donc en exergue des propriétés qui seraient plus fondamentales et empruntent leurs concepts à des champs disciplinaires connexes aux sciences de la vie. Ce sont alors des caractérisations centrées sur des concepts issus de champs disciplinaires telles que la thermodynamique, la chimie des cycles catalytiques, la théorie de l'information, la théorie des systèmes et ses concepts

de régulations, la théorie des systèmes de traitement de l'information, la théorie de la complexité etc.

Au final, l'ensemble dessine une communauté de préoccupations, de recherches visant la caractérisation d'un socle minimal de fonctions ainsi que la définition de l'organisation matérielle élémentaire propre à la manifestation de ces propriétés vitales minimales. Cette quête en constitue en somme le point de fuite qui en assure la mise en perspective.

Cependant demeure une question sous-jacente : toutes les sciences parlent-elles de la vie dans le même sens ? La biologie, et plus généralement les sciences de la vie abordent le vivant à partir des manifestations vitales par des ensembles matériels organisés, alors que la physique, la chimie en étudieraient les conditions de formation et de stabilisation relative. Cela conduit à un jeu disciplinaire qui renvoie à une opposition relevant de la métaphysique, entre la vie comme résultante d'une organisation matérielle déterminée et la vie comme puissance, comme source de causalité autonome. Et c'est l'association, la combinaison de ces deux approches, fondement d'une approche multidisciplinaire, qui finalement conduit à restituer des facettes intéressantes du vivant, à développer sa compréhension.

Il en est ainsi de l'identification du socle de fonctions fondamentales et de l'organisation matérielle minimale propre à rendre possible l'expression d'un caractère vital reconnu. Ou encore de l'identification parmi toutes les formations vivantes de ce qui est commun dans leur organisation matérielle et partant, du jeu entre forces internes au vivant et forces externes. Ce jeu entre forces (ou sources de causalités) est pris dans une acception assez large pour donner une consistance scientifique au degré d'autonomie relative (par rapport aux déterminations externes) des systèmes vivants. Et cette identification du commun préside également à l'identification et au récit d'une histoire commune à l'ensemble des vivants, contribuant là également à constituer et identifier ce commun autour de frontières : celles entre vie et non vie, entre vie artificielle et vie naturelle, entre vie terrestre et vie au-delà de l'environnement terrestre.

Ces réflexions, ces avancées contemporaines font néanmoins encore écho à des questionnements constitués tout au long de l'histoire de la pensée scientifique, comme autant de lignes de forces qui perdurent, même si les réponses contemporaines à certaines de ces interrogations tournent le dos à celles qui, au cours de cette histoire s'imposaient

comme une évidence. L'enquête menée dans la deuxième partie nous laisse en effet penser que les épistémologies en œuvre dans l'appréhension de la vie au cours de l'histoire de la pensée scientifique résonnent encore fortement dans les sciences ou approches contemporaines.

Le mouvement d'appréhension de la chose vivante s'est réalisé à travers la constitution progressive de l'ordre du vivant, c'est-à-dire de la légitimation d'approches unifiant au sein de réseaux de relations, l'ensemble des êtres vivants. Et cette unité du vivant s'est constituée avec son histoire naturelle, au sens originel de l'enquête, de la description de tout ce qui est visible dans la Nature.

Dans le rapide parcours présenté dans la deuxième partie nous avons repéré des problématiques permanentes centrées sur le vivant. Il s'agit tout autant de prendre la vie, l'être vivant comme donnée constitutive d'un ordre naturel, que d'en questionner ce qui relève de la spécificité du phénomène vital dans l'opposition vivant-non vivant. Finalement ce questionnement s'organise au sein d'une tension entre l'observation, l'expérience du tout organisé, l'organisme, et les explications de ses mécanismes fondamentaux par l'entremise d'approches réductrices ; indispensables et nécessaires à la compréhension de l'ajustement des divers éléments participant au mécanisme à analyser. Subsiste alors une contrainte épistémique : le mécanisme comme support d'intelligibilité nécessaire, l'organisation comme limite de sa mise en œuvre.

Les interrogations relatives à la spécificité de la vie, à la singularité des êtres vivants demeurent en se renouvelant tout au long de l'histoire même de la pensée, de ses avancées, notamment à partir de la révolution scientifique des 16^e et 17^e siècles⁴⁶⁶, qui

⁴⁶⁶ Il est bien sûr délicat de résumer un mouvement d'ensemble en quelques principes fondateurs. Cependant un changement fondamental, que pour simplifier on appellera la révolution galiléenne, réside dans une modification radicale de perspective dans l'intelligibilité du monde. A la distinction ancienne entre monde supra lunaire et monde infra lunaire, l'un relevant de l'ordre, de la régularité, l'autre accessible qu'aux seules recensions, aux histoires naturelles, s'est substitué un univers unifié dont l'intelligibilité relève a priori des mêmes principes, des mêmes lois, des mêmes approches méthodologiques (l'observation et l'expérimentation scientifique ?) Cet extrait des Etudes d'histoire de la pensée scientifique d'Alexandre Koyré nous paraît à cet égard significatif : « ...La dissolution du Cosmos signifie la destruction d'une idée : celle d'un monde de structure finie, hiérarchiquement ordonné, d'un monde qualitativement différencié du point de vue ontologique ; elle est remplacée par celle d'un Univers ouvert, indéfini et même infini,

permettent de reprendre ces interrogations à nouveaux frais. Et ce mouvement tend *de facto* au dépassement de l'anthropomorphisme implicite résultant de notre rapport au vivant et vise à constituer l'ordre vivant comme un fait de nature qu'il convient d'interroger, d'expliquer et finalement comprendre.

Dans ces interrogations, on retrouve ainsi un fil conducteur constant, celui de la caractérisation de la vie et des êtres vivants à travers une opposition structurant le monde entre vie et non-vie. Et cette opposition induit la recherche, le questionnement de ce qui différencie la vie du restant des phénomènes en œuvre dans le monde. Saisir l'essence même de cette différenciation mène à la recherche au plus fin de l'organisation vivante. Ces questionnements ont également conduit à attribuer ce principe de différenciation à un principe vital, comme nouvelle loi de la Nature bénéficiant du même statut que celles de la physique et justiciable d'une approche scientifique. Impasse théorique lorsqu'exprimée sous forme d'un vitalisme radical, la recherche de ce principe de différenciation introduit néanmoins à la quête d'un principe « recteur », pour reprendre une expression de Claude Bernard, afin de rendre compte de l'organisation vitale.

Cette démarche s'inscrit dans un mouvement constant de la pensée visant à saisir la vie dans le cadre d'une physique spéciale, voire singulière opposée ou différente de la physique commune. Mais elle interpelle également la pensée de la vie comme principe transcendantal *versus* la vie comme propriété résultante. Et ce dernier point conduit à une focalisation progressive sur l'organisation, elle-même propriété singulière des objets dotés de vie.

L'inscription de la vie dans une histoire de longue durée relève également d'approches plus récentes, constituées au tournant du 19^e siècle. Dans ce mouvement plus récent, l'histoire des vivants et celle du vivant fonde la cohérence entre phylogénèse et ontogénèse et met en exergue des temporalités singulières. La démarche d'interrogation de la vie comme phénomène naturel, poussée à son terme, se devait également d'englober

qu'unifient et gouvernent les mêmes lois universelles ; un Univers dans lequel toutes choses appartiennent au même niveau d'Être, à l'encontre de la conception traditionnelle qui distinguait et opposait les deux mondes du Ciel et celles de la Terre désormais fondues ensemble... ». Voir Koyré Alexandre, *Études d'histoire de la pensée scientifique. Galilée et Platon*. Edition Tel Gallimard, 1973

le questionnement de la genèse même des organismes vivants et d'abandonner les mythes de la création pour tenter de rendre compte, à travers la biologie naissante, du passage d'un ordre minéral à l'ordre vivant. Ce sera le thème du temps comme « grand ouvrier de la nature », de la durée comme processus de création qui est ainsi décliné.

Dans la dernière partie, notre enquête s'est focalisée sur le recours aux modèles. L'analyse détaillée et comparative de trois approches théoriques, cette fois ci totalement contemporaines, est emblématique des démarches théoriques mettant en scène ces représentations globales du vivant. Dans cette perspective, nous avons ainsi analysé trois modèles globaux du vivant afin de constituer des exemples paradigmatiques de classes d'approches associant étroitement l'affichage de principes fondamentaux et l'emploi de formalismes adaptés, assurant ainsi la convergence de diverses approches disciplinaires. Cette démarche d'intégration de théories scientifiques se révèle pour notre part fructueuse et conduit à caractériser le système vivant en explicitant les présupposés théoriques nécessaires au recours d'un formalisme adéquat. Par-là, il nous a semblé possible de dépasser le constat maintes fois répété d'absence de définition univoque du vivant comme conséquence de l'absence de théorie générale de la vie.

Ces trois catégories d'approches constituent autant de points d'entrées à des familles de modèles. L'analyse détaillée de modèles emblématiques de ces familles est propre à cerner trois facettes fondamentales du vivant : le vivant comme organisme, le vivant comme système auto poïétique, le vivant comme système matériel « darwinien ».

La modélisation sert ici de médiation entre lois nomologiques, celles de la physique et de la chimie (au sens large incluant la thermodynamique, les systèmes complexes etc.) et des données empiriques procédant des sciences de la vie. Et selon l'angle d'attaque retenu, le style de théorisation retenu, elle entraîne une démarche de formalisation adéquate caractérisant tel ou tel aspect de la vie. L'idéalisation sélectionnant les traits les plus représentatifs de la structure vivante permet de simplifier les représentations pour viser l'essentiel. En l'absence de lois générales de la vie, le(s) modèle(s) formalise(nt) un lien étroit entre la réalité représentée et le système de connaissance mis en œuvre. Par-là, ils sont porteurs d'un véritable engagement philosophique.

Rappelons tout d'abord qu'avec Rosen c'est la caractérisation d'une différence essentielle entre l'organisme (vivant) et la machine qui est au cœur de la démarche d'une modélisation revendiquée comme seule apte à capter le fondement d'une structure matérielle de la nature (d'un morceau de réalité). Ce qui rend une telle structure vivante, c'est l'internalisation d'une contrainte formalisée dans le cadre d'une approche de topologie structurale caractérisant l'organisme comme un tout. L'internalisation de contraintes nouant trois fonctions fondamentales garantit la permanence du tout de l'organisme : métabolisme (M), réparation (R) et une fonction β dite de réplication (non directement identifiable à la réplication au sens biologique).

Le *chemoton* de Tibor Gánti peut être considéré comme une forme de réalisation du modèle M,R abstrait précédent, en se rapprochant un peu plus d'un concept autopoïétique d'organisme vivant élémentaire. Trois sous-systèmes, support de fonctions, au sens biologique cette fois ci, sont également nécessairement liés et intriqués. Les sous-systèmes métabolique, membranaire et de régulation/réplication sont couplés afin de former le tout indissociable de l'unité vivante élémentaire. Ce système global est construit de telle manière qu'il puisse s'insérer dans une flèche d'évolution temporelle. En raison de la mise en œuvre de mécanismes de réplication avec erreur, des *chemotons* aux propriétés différenciées émergent et sont susceptibles de subir une pression de sélection.

Cette dimension temporelle est présente dans les systèmes intrinsèquement évolutifs tels que modélisés par Eigen ou plus récemment Addy Pross. Elle est au fondement de la conception d'ensembles matériels évolutifs (des systèmes darwiniens) qui sont stabilisés grâce à leur dynamique d'évolution.

Les modèles globaux du vivant sont donc au cœur de démarches explicatives, tant sur la genèse de ces structures matérielles que pour rendre compte sur le fond de ce qui les différencie d'autres structures matérielles. Ils rendent compte de ce qui est commun à toutes les structures vivantes et dans le même mouvement explicatif de ce qui les distingue du restant du monde.

Ils sont porteurs d'une ambition : fonder une théorie de la vie en rendant compte par la mobilisation de principes théoriques reconnus, de ce qui « fait » qu'un élément matériel puisse être vivant. De ce point de vue, le concept de vivant élémentaire est particulièrement éclairant. Revendiquant (cf. Gánti) un statut similaire à celui du point matériel dans un champ de force de la physique newtonienne, il montre en quoi la

propriété vitale n'est plus externe au système matériel mais internalisée, immanente à une forme d'organisation.

Par ailleurs, en tant que systèmes formalisés, les modèles constituent également un objet d'étude par la possibilité affirmée de manipulations qu'ils permettent (simulation informatique), ouvrant des perspectives de sérendipité par leur exploitation.

Ils contribuent à étayer l'affirmation que la vie n'est qu'un mode de réalisation de la matière en mettant fondamentalement l'accent sur une spécificité résidant dans l'organisation des relations (sous contrainte, particulière, dynamique) au fondement de l'originalité de la vie.

Pour conclure ce point, l'approche modélisatrice constitue une mise en œuvre d'un principe de pluridisciplinarité en réalisant la convergence autour de l'objet à modéliser de plusieurs disciplines scientifiques. La démarche d'élaboration elle-même, est affirmation de l'approche pluridisciplinaire.

Finalement quels sont les éléments tangibles qui pourraient être tirés de cette enquête à trois volets : descriptif, historique, figuratif ? Ce que nous avons tenté de restituer ce sont des regards, des angles d'approches multiples permettant de saisir la singularité du vivant tant dans la littérature scientifique à travers le kaléidoscope définitionnel, que dans les représentations formelles de structures matérielles organisées, angles d'approches sous tendues par la permanence d'interrogations répétées que nous avons tenté de repérer dans l'histoire de la pensée. Et à travers cette recension, mise en perspective par notre interrogation concernant la singularité de la vie, peut-on considérer que nous avons avancé dans la compréhension de ce qui caractérise le vivant ? Est-on alors en mesure de statuer sur ce qui constitue la spécificité de l'objet vivant et de tenter à travers un nouvel essai⁴⁶⁷ de définition de la vie une synthèse, nécessairement provisoire

⁴⁶⁷ Il s'agit bien d'un exercice synthétisant l'apport de notre enquête à la compréhension de la vie. L'essai de définition résume cet apport en accentuant la dimension matérielle de ce que nous appelons les « êtres vivants » et pour tout dire la longueur même de ce qui participe du *definiens* montre bien qu'il n'y a toujours pas de définitions synthétique ou de formule générale et concise de la vie. La recherche d'une telle définition reste cependant utile au développement des disciplines qui mettent la vie au cœur de leurs

car susceptible de critique, résumant ce parcours ?

Fondamentalement, en mettant l'accent sur l'organisation élémentaire des systèmes vivants, ce sont les relations qui sont au cœur de la vie : relations intra cellulaires et extra cellulaires. Elles sont au cœur de la structuration de la réalité vivante en tant que vivant individualisé, en tant qu'expression collective.

Nous dirions alors qu'être vivant c'est la disposition d'un système matériel permettant d'exhiber un ensemble de propriétés intéressantes ⁴⁶⁸, dont certaines fondamentales, constituent le noyau des propriétés vitales. Le fondement de cette disposition matérielle est constitué de l'union étroite, la relation constante, entre trois catégories d'activités : le métabolisme, la régulation, la fermeture spatiale assurant une clôture partielle du système. L'ensemble permet de produire par son activité chimique les éléments nécessaires à son maintien et son évolution. Cette union repose sur des mécanismes chimiques particuliers résultant de l'association étroite de propriétés répliquatives et des propriétés catalytiques de matériaux polymériques. Ce fonctionnement couplé rend possible la stabilisation dynamique d'un ensemble plongé dans un environnement assurant l'apport énergétique ainsi que celui des matériaux élémentaires. Cet ensemble, via des mécanismes appropriés, est également source de synthèse des molécules nécessaires à la formation de la membrane semi perméable qui assure l'isolement réactionnel relatif de l'ensemble. La réplication est au cœur de l'activité, sa fidélité relative (dont le degré est fonction de l'efficacité catalytique) est la source de différenciations continues et de la formation d'ensembles qui pourront ainsi être soumis à une pression de sélection (efficacité énergétique, rapidité de reproduction, plasticité adaptative à l'environnement...) Les propriétés de tels systèmes se manifestent individuellement et collectivement : reproduction liée à la croissance, différenciation pour

investigations (voir première partie) comme une mise en perspective nécessaire à leurs interrogations. Et cette mise en perspective a tout intérêt à être explicitée plutôt que demeurer dans l'implicite. S'agissant des problématiques autour de l'intérêt de définir la vie, voir : Machery Edouard, Why I stopped worrying about the definition of life...and why you should as well. *Synthese*, 2012, 185: 145-164

⁴⁶⁸ Intéressante, dans le sens où cette structure matérielle présente des phénoménologies remarquables pour la communauté scientifique. Cette part subjective constitue comme un aiguillon à l'investigation savante pour accéder à une compréhension, encore parcellaire, de la spécificité constituée par cette organisation matérielle.

exploiter des niches énergétiques et matérielles, constitution de réseaux en équilibres métastables etc.

Il ne s'agit pas bien sûr d'une définition, mais d'un résumé tiré de notre enquête. Il permet de mettre en perspective trois niveaux d'approches du vivant : celui des principes fondamentaux, celui de leurs déclinaisons matérielles, et enfin celui des conséquences et propriétés qui en découlent, c'est-à-dire des phénoménalités associées. Et ce que nous plaidons, c'est que c'est le niveau d'approche des déclinaisons matérielles qui est fondamental, le reste n'étant que la conséquence d'organisations matérielles singulières, de rapports entre éléments matériels qui de par leur dynamique d'évolution se jouent - apparemment- du tropisme induit par la deuxième loi de la thermodynamique.

Apparaît en filigrane une problématique complémentaire à celle de la définition du vivant. Elle est liée au degré de proximité ou de dépendance entre la matière du vivant « tel que nous le connaissons » et ses propriétés vitales. Le lien entre vie et matière est bien évidemment étroit. Toute tentative d'identifier un principe vital comme réalité déconnectée de la matière qu'elle animerait s'est révélée être une impasse théorique, soit parce que sans cesse dans sa quête elle ne renvoyait *de facto* qu'à un approfondissement de la connaissance, à une investigation plus fine de cette matière animée, ou alors à l'inverse parce qu'en affirmant ainsi une cause qui nécessairement serait plus large que les effets produits, elle stérilisait toute forme d'interrogation scientifique ultérieure.

Ce qui est néanmoins à l'œuvre c'est l'effort humain, l'opération de l'esprit permettant d'abstraire des réalités vivantes tangibles à sa disposition, les principes de l'organisation matérielle qui président à l'expression de toute forme de phénoménalité vitale. Et dès lors se pose la question du degré de latitude entre ces principes vitaux et leurs incarnations matérielles. En reprenant le vocabulaire de l'émergence, est posée la possibilité de la multi réalisation des fonctions (vitales) par des bases matérielles différentes.

La vie ne peut-elle n'être que la manifestation d'entité matérielles discrètes, des cellules composant ou formant des réseaux d'interrelations complexes (unicellulaires, multicellulaires etc.), possédant, en raison de la chimie de ses composantes matérielles (macromolécules) la propriété d'auto maintien par la stabilité dynamique du réseau

dérivant des cinétiques des réactions de réplifications⁴⁶⁹ ? Dans ce cas la matière mise en œuvre doit être très proche de celle du vivant terrestre « tel que nous le connaissons », avec notamment l'ARN en raison de ses propriétés duales de catalyse et de réplification, l'ADN pour ses propriétés de stabilité etc.

La recherche de ce qui est commun à l'ensemble des structures matérielles qualifiées de vivantes introduit de même à la mise en exergue des problématiques du temps et de la durée. Familier à toute approche inscrivant le vivant dans des séries chronologiques longues, le temps apparaît également comme paramètre de différenciation fondamental : différenciation entre les rythmes des mouvements de la matière externe au vivant et ceux internes au système qui est ainsi doté de temporalités propres, fondement de son autonomie. La dichotomie temporalités internes versus temporalités externes, apparaît comme l'un des fondements essentiels des systèmes vivants.

Cette différenciation de temporalités est au fondement de propriétés singulières caractérisées par l'autonomie (partielle) et l'individuation (relative) des systèmes vivants. Autonomie dans le sens où, pour l'observateur, le système vivant non seulement perdure dans des environnements variables, mais également met en œuvre des stratégies d'adaptation à court et moyen terme et finalement est durant sa durée d'existence (sa vie), en interaction permanente avec cet environnement dont il exploite les potentialités.⁴⁷⁰ Sous ce rapport, l'individuation semble en être le corollaire. Mais les choses sont néanmoins plus complexes, car l'enjeu pour la caractériser, la saisir et la comprendre, nécessite de prendre en compte « ce » qui fait système. Autant l'autonomie s'inscrit aisément comme conséquence de la différenciation de ces systèmes matériels par rapport à leur environnement, sous l'angle du découplage des contraintes temporelles et ce quel que soit leur délimitation topologique, autant penser l'individuation suppose une stricte séparation physique, une clôture (toujours relative néanmoins) du système matériel vivant. Cela semble aller de soi, tant le dogme cellulaire s'impose à l'appréhension du vivant. Mais les regroupements nécessaires, imposés par les dynamiques d'évolution propres de chaque

⁴⁶⁹ D'après Pross Addy, *What is Life? How Chemistry Becomes Biology*. Déjà cité.

⁴⁷⁰ Stengers Isabelle, *Quelles questions poser aux vivants ? Comment définir la vie ?* Ouvrage collectif dirigé par Hugues Bersini et Jacques Reisse. Vuibert, 2007

système vivant peuvent en brouiller les approches : plantes à rhizomes, colonies formant des super organismes, films bactériens....

L'enjeu reste, dans cette perspective de pouvoir saisir, c'est-à-dire caractériser une rupture au sein d'un continuum : continuum dans la réalité matérielle elle-même et continuité des lois physicochimiques. Et la façon dont se sont élaborées les réponses conduit à caractériser la nature de cette « rupture » comme étant la formation d'un objet matériel possédant un potentiel d'opportunités. La conséquence dans cette caractérisation est de spécifier la vie autrement que par la recherche d'une « loi » prenant place dans l'arsenal des lois de la Nature, mais de le faire par la déclinaison matérielle, concrète, réelle, des lois et principes physico chimiques existant dans des instances matérielles données dont les limites d'existences sont strictement déterminées par des conditions environnementales propices (énergétiquement, chimiquement, etc...), mais qui au sein de ces plages de possibilités peuvent se déployer au gré du hasard des occasions.

Mais la caractérisation de la rupture n'entraîne pas ipso facto la possibilité de pouvoir en saisir la formation dans le détail pour deux raisons : la complexité des interactions qui semblent inaccessibles analytiquement et leurs formations fruit d'histoires singulières non reproductibles. Elles ferment ainsi la possibilité d'en retracer le détail. Une des conséquences épistémologiques serait alors d'imposer un cadre émergentiste comme cadre-méta théorique à notre compréhension de ce qu'est le vivant, de sa formation. Ce cadre acterait par son expression même une forme de rupture épistémique, l'impossibilité d'expliquer les propriétés du « tout », notamment de son pouvoir causal, à partir de celles des niveaux intermédiaires en mettant en œuvre une démarche de théorisation unique, tout en conservant la possibilité d'analyses partielles partant de réductions locales afin de rendre compte de tel ou tel aspect particulier. On ouvrirait ainsi la possibilité fructueuse d'approches empiriques guidées : modélisations, synthèses partielles, manipulations locales, etc. afin de tendre vers une compréhension de plus en plus large du phénomène vivant.

Le vivant reste dès lors un objet singulier, ne se dévoilant que dans l'analyse du jeu des interactions multiples avec l'environnement, dans une sorte de maïeutique qui en révélerait les fondements matériels.

Inscrire le vivant dans la durée, notamment dans la perspective de son évolution, renvoie à une question fondamentale. Elle porte sur l'émergence même de cette structure matérielle dotée des capacités à évoluer le long d'une trajectoire temporelle de longue durée. Mais c'est en somme une émergence à double détente qu'il serait nécessaire d'imaginer. Elle concerne d'abord la genèse de tels systèmes matériels, leur évolution en tant que population de systèmes matériels en interactions, protobiotique, pour aborder ensuite la formation des systèmes qu'au regard de notre pratique des vivants actuels on qualifiera de vivants. Ce processus d'émergence induit un problème épistémologique intéressant. Il est de pouvoir penser dans un cadre scientifique cohérent, sinon unifié, une évolution matérielle faite de continuité et de discontinuité. Et sous ce rapport il interpelle et les approches proposant une définition minimaliste de la vie ou d'une structure matérielle élémentaire vivante et celles se proposant d'en saisir leur formation. La première, en mettant l'accent sur la genèse d'une structure permanente et stable, introduit une discontinuité dans un continuum matériel et théorique. La deuxième, en ne voyant qu'une pure continuité matérielle, une évolution partant de composés organiques simples (monomères d'acides aminés, d'acides nucléiques etc.) pour aller vers la formation progressive, sans solution de continuité, de systèmes de plus en plus complexes, évacue toute singularité. Pouvoir unifier ces deux approches, c'est finalement penser la vie comme un nouvel état de la matière.

Références

- Adami C. *Introduction to artificial life*. New York : Springer-Verlag, 1998.
- Alexander J., *Life: Its Nature and Origin*. Reinhold Publishing Company, New York, 1948
- Aristote, *De l'Ame*, II, 2, 413ab tr. fr. Tricot, éd. Vrin. Disponible sur : philia.online.fr
- Aristote, *Métaphysique* V.Δ, 1013a-1014a. Traduction de J. Tricot. Edition de 1953
- Atlan Henri. *Le vivant post-génomique ou qu'est-ce que l'auto-organisation ?* Paris : Odile Jacob, 2011
<http://avida.devosoft.org/>
- Babloyanz A., *Molecules, Dynamics and Life*, John Wiley & Sons, Hoboken NJ, 1986
- Baltscheffsky H., Major « anastrophes » in the origin and early evolution of biological energy conversion. *Journal of Theoretical Biology*, 187,495-501, 1997
- Baly ECC, Davies JB, Johnson MR, Shanassy H. The photosynthesis of naturally occurring compounds. 1. The action of ultraviolet light on carbonic acid. *Proc. Roy. Soc. London*, 1927, A 116: 197–208
- Barthez Paul-Joseph. *Nouveaux éléments de la science de l'homme*. Jean Martel imprimeur du Roi : 1778, disponible sur : <https://play.google.com/books>.
- Bastian H.C., cited in *The Nature and Origin of Living Matter*. p.147, Fisher Unwin, London, 1872
- Beale L.S., *Disease Germs, their Nature and Origin*. London 1872, p.9
- Benner Steven A., Sismour Michael A., Synthetic Biology. *Nature Reviews Genetics*, 2005, Volume 6: 543
- Beck W.S., Liem K.F., Simpson G.G., *Life: An Introduction to Biology*, 3rd ed., New York, Harper Collins Publishers, 1991
- Bedau Mark A. *The nature of life*. Published in: Margaret Boden, *The Philosophy of Artificial Life*. Oxford University Press: 1996:pp. 332-357
- Bedau Mark A. Four Puzzles about Life. *Artificial Life*, 1998, 125-140
- Bensaude-Vincent B., Isabelle Stengers. *Histoire de la chimie*. Paris : La découverte, 1993
- Bernal J.D., *The Origins of Life*. Weinfeld and Nicholson, London, 1967
- Bernard Claude. *Leçons sur les phénomènes de la vie communs aux animaux et aux végétaux*. Paris : Librairie philosophique J.Vrin : 1966
- Bernard Claude. *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale*. Garnier-Flammarion : 1966
- Bersini Hugues et Reisse Jacques, Editeurs. *Comment définir la vie ? Introduction*. Paris : Vuibert, 2007
- von Bertalanffy Ludwig. *Théorie générale des systèmes*. 1968. Paris : Bordas, 1973 pour la traduction française.
- Bichat Xavier. *Recherches physiologiques sur la vie et la mort*. Paris : GF-Flammarion, 1994
- Bitbol-Hespériès Annie. Le principe de vie chez Descartes. Paris : Librairie philosophique J.Vrin, 1990
- Blumenbach Johann Friedrich. *Über den Bildungstrieb und das Zeugungsgeschäft*. Göttingen 1780. Disponible sur : http://www.johann-friedrich-blumenbach.de/3_DIGITALISATE.htm.
- Bot Ludovic. *Philosophie des sciences de la matière*, page 280. Paris : L'Harmattan, 2007
- Brack A.; Trouble M., Defining life: connecting Robotics and chemistry. *Origin Of Life and Evolution of The Biosphere*, 2010, 40: 131 – 136
- Bruce Alberts, Alexander Johnson, Julian Lewis, Martin Raff, Keith Roberts, Peter Walter. *Molecular Biology of the cell*. Garland Science, 2002
- de Buffon Georges-Louis Leclerc. *Histoire naturelle générale et particulière. Tome IV : Discours sur la nature des animaux*. Edition en ligne : www.buffon.cnrs.fr
- Burian Richard M. *On conceptual change in biology: The case of the Gene*. Cambridge University Press : 2004
- Canguilhem Georges. *La connaissance de la vie. Introduction : La pensée et le vivant*. Paris : Librairie Philosophique J.Vrin, 1989
- Canguilhem Georges. *Encyclopédie Universalis. Dictionnaire de la philosophie*. Paris : Albin Michel, 1989
- Canguilhem Georges. *Etudes d'histoire et de philosophie des sciences concernant les vivants et la vie*. Paris : Librairie philosophique J.Vrin, 2002
- Canguilhem Georges. *La connaissance de la vie. Aspects du vitalisme. Problèmes et controverses*. Paris : Librairie philosophique J. Vrin, 1989
- Capra F., *The Web of Life: A New Synthesis of Mind and Matter*, Flamingo, London 1997
- Caramon, Victor Antoine duc de., *Charles Bonnet, philosophe et naturaliste*. Sa vie et ses œuvres. Paris : A.Vaton,

1859

- Cardena Maria Luz, Letelier Juan-Carlos, Gutierrez Claudio, Cornish-Bowden Athel, Soto-Andrade Jorge. Closure to efficient causation, computability and artificial life. *Journal of Theoretical Biology*, 2010
- Changeux Jean-Pierre. *Qu'est-ce que la vie ? Organisation et Régulation*. Dans : Comment définir la vie. Ouvrage collectif dirigé par Hugues Bersini et Jacques Reisse. Paris : Vuibert, 2007
- Cartwright Nancy. *How the laws of physics lie*. Clarendon Paperbacks. Oxford University Press : 1983
- Chemero A., Turvey M.T. *Complexity and closure to efficient cause*. In: Ruiz-Moreno K., Barabdiaran R. (Eds). ALIFE X: Workshop on Artificial Autonomy. MIT Press. Cambridge, 2006, MA pp13-18.
- Chrisantha Fernando, Ezequiel Daniel Di Paolo. The Chemoton: A Model for the Origin of Long RNA Templates. *Ninth International Conference on the Simulation and Synthesis of Living Systems (ALIFE9)*, 2004
- Clark O.G., Kok R., Engineering of highly autonomous biosystems: Review of the relevant literature. *International Journal of Intelligent Systems* 13, 8,748-783, 1998
- Clarke Ellen. The Problem of Biological Individuality. *Biological Theory*, 2011: 5. (4):312-325
- Cleland C.E.; Chyba C.F., Defining Life. *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 2002, 32: 387-393
- Comte Auguste. *Cours de philosophie positive*. Tome 3. 41^{em} leçon.p.500.. Disponible sur : <http://gallica.bnf.fr/>
- Cornish-Bowden Athel; Cardenas Maria Luz. Organizational Invariance in (M,R)-Systems. *Chemistry and Biodiversity*, 2007, Vol. 4
- Cornish-Bowden Athel, Cardenas Maria Luz. Self-organization at the origin of life. *Journal of theoretical biology*, 2008, 252 : 411-418
- Crick F.H.C., Brenner S., Klug A., Piecznik G. A speculation on the origin of protein synthesis. *Origins of Life*, 1976, 7 : 389-397
- Crick, F.H.C. The origin of the genetic code. *Journal of Molecular Biology*, 1968, 38 : 367-79
- Csanyi V., Kampis G., Autogenesis : The evolution of replicative systems. *Journal of Theoretical Biology*, 14,303-321, 1985
- Csendes T. A., Simulation study on the chemoton. *Thales Publication : Kybernetes*, 1984, vol.13
- Cuvier Georges. *Leçons d'anatomie comparée. Tome premier. Lettre à J. C. Mertrud*, p. 5. An VIII. Cuvier Georges. *Leçons d'anatomie comparée. Tome premier. Première leçon. Esquisse générale des fonctions que le corps animal exerce*. Disponible sur : <http://books.google.fr/books>.
- Dagognet François. *Réflexions épistémologiques sur la vie et le vivant*. Disponible sur : Philagora : www.philagora.net.
- Darwin Charles. *L'origine des espèces*. Paris : GF Flammarion, 1992
- Darwin Charles. *L'Hypothèse provisoire de la pan genèse*. Presses Pocket, Collection Agora, Les classiques, 1990
- Delahaye Jean Paul. *Complexité aléatoire et complexité organisée*. Versailles: Editions Quae. Sciences en questions., 2009
- DeLoof A., Schrödinger 50 years ago : "What is Life?" "The ability to communicate", a plausible reply? *Int.J.Biochem.* 25,1715-1721, 1993
- Descartes René, *Le Monde. Chapitre II En quoi consistent la chaleur et la lumière du feu*. Classiques Garnier Edition de F. Alquier.
- Descartes René, *L'Homme. Œuvres philosophiques*. Tome I. 1618-1637. Edition de F. Alquié. Classiques Garnier.
- Descartes René, *Œuvres complètes, Tome XI, La description du corps humain*. Paris : Vrin, 2000
- Descartes René, *L'homme de René Descartes et la formation du fœtus*. Disponible sur : <http://gallica.bnf.fr/>
- Descartes René, *Lettre à Plempius, 3 Octobre 1637*. Œuvres de Descartes publiés par Charles Adam et Paul Tannery. Correspondance: Avril 1622 février 1638. Paris Librairie philosophique J.Vrin.
- Descartes René, *Principes de philosophie, première partie*. Disponible sur : <http://gallica.bnf.fr/>
- Dolev Mor, Ihmels Jan. *Quasi-species, error threshold and hypercycles. A model for Molecular Evolution*. Présentation au Weizmann Institute of Science.
- Duchesneau François. *Leibnitz le vivant et l'organisme. et le mécanisme*. Paris : Mathesis Vrin, 2010
- Duchesneau François. *Leibnitz Stahl Divergence sur le concept d'organisme*. Studia Leibnitiana: 1995, Bd. 27, H. 2 pp. 185-212, disponible sur : <http://www.jstor.org/stable/40694276>
- de Duve C. *Blue Print for a cell: the nature and origin of life*. Burlington. North Carolina: Neil Patterson Publishers, 1991
- de Duve C. *A l'écoute du vivant*. Odile Jacob poches, 2005
- de Duve C. *Singularités, jalons sur les chemins de la vie*. Odile Jacob Science, 2005
- Dyson F., *Origins of Life*. Cambridge University Press, 1997
- Dyson F., *Life in the Universe: Is Life Digital or Analogue?* NASA Goddard Space Flight Center Colloquium, Greenbelt MD., 1999
- Dyson F., Colloquium at NASA's Goddard Space Flight Center, 2000
- Eigen M., Selforganization of Matter and the Evolution of Biological Macromolecules. *Die Naturwissenschaften*.

1971, 58,465-523

Eigen M., Schuster P., The Hypercycle. A principle of natural self-organization. Part A: Emergence of the Hypercycle. *Die Naturwissenschaften*, 1977, 64, 541-565

Eigen M., Schuster P., The Hypercycle. A principle of natural self-organization. Part B: The abstract Hyper cycle. *Die Naturwissenschaften*, 1978, 65, 7-41

Eigen M., Schuster P., The Hypercycle. A principle of natural self-organization. Part C: The realistic Hyper cycle. *Die Naturwissenschaften*, 1978, 65, 341-369

Elgin M. ; Sober E.; Cartwright N., on explanation and idealization. *Erkenntnis* 2002, 57: 441-450

Elsasser Walter. Synopsis of organismic theory. *Journal of Theoretical Biology*, 1964, 7

Engels F., *Dialectic of Nature*. Editd by Dutt C.D. 1940

Folsome C.E., *The Origin of Life*. Freeman, San Francisco, 1979

Fong P., Thermodynamic statistical theory of life: an outline. In : *Biogenesis, Evolution, Homeostasis. A symposium by Correspondance*. Pp. 93-101, Springer-Verlag, Berlin 1973

Foucault Michel. *Les mots et les choses*. Une archéologie des sciences humaines. Chap.V : Classer. Paris : Gallimard. Collection Tel.1996

Fox S.W. Synthesis of Life in the Lab? Defining a Protoliving System. *The quarterly Review of Biology*, 1991, 66 (2)

Fox Keller Evelyne, *Making sense of life: Explaining Biological Development with Models, Metaphors, and Machines*. Harvard University Press, 2009

Fry Iris, Are the different hypotheses on the emergence of life as different as they seem? *Biology and Philosophy*. October 1995, Volume 10, Issue 4, pp 89-417

Gánti T., Organization of chemical reactions into dividing and metabolising units: the chemotons. *BioSystems* 7, 189-195, 1975

Gánti Tibor. *The principles of Life*. Oxford University Press : 2006

Gánti Tibor. Chemoton Theory vol.1. *Theoretical foundations of fluid machineries*. Kluwer Academic/Plenum Publisher : 2003

Gánti Tibor. *Chemoton Theory Vol.2. Theory of living systems*. Kluwer Academic/Plenum Publishers : 2003

Gatherer Derek. The Systems Biology of Walter Elsasser (1904-1991). *The Open Biology Journal*, 2008, 1, 9-20

Gayon Jean. Defining Life: Synthesis and conclusions. *Origin of Life and Evolutio of the Biosphere*. 2010, 40

Gayon Jean. *La génétique est-elle encore une discipline?* M/S : médecine sciences. 2004, Volume 20, numéro 2.

Gayon Jean, de Ricqlès A. *Les fonctions : des organismes aux artefacts*. Science Histoire et société. Paris : Presse Universitaire de France, 2010

Gayon Jean. *De la biologie comme science historique*. Sens Public. www.sens-public.org

Gilbert Walter. Origin of life: The RNA world. *Nature* 1986, 319, 618

Goldstein Kurt. *La structure de l'organisme*. Paris :Tel. Gallimard, 1983, p 435

Gutierrez Claudio, Jaramillo Sebastian, Soto-Andrade Jorge. Some Thoughts on A. H. Louie's "More Than Life Itself: A Reflection on Formal Systems and Biology". *Axiomathes*, 2010

Griesemer James, *Chemoton models and origins-of-life scenarios: A reproducer perspective*. Université Paris, IHPST (Institut d'histoire et de philosophie des sciences et des techniques), Paris France, October 24, 2011

Grote Mathias. Jeewanu, or the 'particles of life'; The approach of Krishna Bahadur in 20th century origin of life research. *Journal of Bioscience*, 2011, 36(4)

Hamilton. *Lectures on logic: the Doctrine of Division*. London : Blackwood, 1860, vol. II, lecture XXIV, 9-21

Haeckel Ernst. *Treizième Leçon*, p 290. 1868. Cité par Anne Fagot-Largeault : 2006, Collège de France: Ontologie du Devenir I.2

Haldane J.B.S. *The Origin of Life*. Disponible sur : <http://www.uv.es/~orilife/textos/Haldane.pdf>

Haukioja E., Are individuals really subordinate to genes ? A theory of living entities. *Journal of Theoretical Biology*, 99, 357-375, 1982

Hazen R.M., *Selective adsorbtion ol L- and D- amino acids on calcite: implication for biochemical chirality*. Proc.Natl.Acad.Sci. 98, 5487-5490, 2001

Hegel Georg Wilhelm Friedrich. *Phénoménologie de l'Esprit*. Traduction de Jean Hyppolite. Aubier, Bibliothèque Philosophique, 1977

Hempel Carl. *Elements d'épistémologie*. Armand Colin, 2em edition, 2006

Hitching Francis, *The Neck of the Giraffe: Where Darwin Went Wrong*, New York : Ticknor and Fields, 1982, p. 204

Hoffmann Fr. *La Médecine Raisonnée*. Traduction par Jacques-Jean Bruhier. Librairie Briasson 1739. Disponible sur : <https://play.google.com/store/books/>

Holton Gerald. *Thematic Origins of Scientific Thought*. Revised Edition. Harvard University Press; Cambridge, Massachusetts and London, England, 1988

- Horowitz N.H., On defining Life. In : The origin of life on earth, Ed. Clark, Synge R.L., pp.106-107, Pergamon, London 1959
- Horowitz N.H., *To Utopia and Back: The search for Life in the Solar System*, Freeman H.W., New York 1986
- Hotchkiss R.D., *The assimilation of amino acids by respiring washed Staphylococci*. Arch.Bioch. 65(1), 302-318, 1956
- Huneman Philippe, *Métaphysique et biologie - Kant et la constitution du concept d'organisme*. Paris : Editions Kimé, 2008
- Huneman Philippe. Naturalizing purpose: From comparative anatomy to the adventure of reason. *Science direct. Stud. Hist. Phil. Biol. & Biomed.* 2006.
- Huneman Philippe, Rey Anne-Lise, Stahl, Leibniz et la controverse du Negotium otiosum, *Bulletin d'histoire et d'épistémologie des sciences de la vie*, Septembre 2007, p. 214-238
- Huxley Th., *On the physical basis of life*. 1868. Disponible sur : <http://aleph0.clarku.edu/huxley/CE1/PhysB.html>.
- Huxley Th., *Les sciences naturelles et le problème qu'elles font surgir* Paris. 1877. Disponible sur : <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k5817649p>
- Jablonska E. ; Lamb M. *Epigénétique inheritance and evolution*. Oxford University Press, 1995
- Jacob François. *La logique du vivant. Conclusion : L'intégron*. Paris :Tel Gallimard,1970
- Jacyna L.S. Immanence or Transcendence: Theories of Life and Organization in Britain, 1790-1835. *Isis*, 1983, Vol. 74, No. 3: pp. 311-329.
- Jeuken M., The biological and philosophical definitions of life. *Acta Biotheoretica* 1975, XXIV (1-2) 14-21
- Jibu M., Yasue K., Hagan S., Evanescent (tunneling) photon and cellular "vision". *BioSystems* 42, 65-73, 1967
- Johnston W.K., Unrau P.J., Lawrence M.S., Glasner M.E., Bartel D.P., RNA-catalyzed RNA polymerization: accurate and general RNA-plated primer extension. *Science*, 2001, 292, 1319-25
- Jonas Hans. *Le phénomène de la vie, vers une biologie philosophique*. De Boeck Université, 2001
- Joyce G.F., *Foreword in : Origins of Life : The Central Concepts*. Ed. By Deamer D.W., Fleischaker G.R., Jones and Bartlet Publishers, 1994
- Kant Emmanuel. *Critique de la faculté de juger*. V, 374 V, 375. Ed Gallimard, 1985
- Kant Emmanuel. *Rêves d'un visionnaire* 1776 II. Cité dans G. Canguilhem. Article « vie ». Encyclopédie Universalis.
- Kauffman Stuart A., Autocatalytic sets of protein. *Journal of Theoretical biology*,1986, Vol.119, issue1
- Kauffman Stuart A., *Origins of Order: Self-Organization and Selection in Evolution*. Oxford University Press.1993.
- Kauffman Stuart A., *At home in the universe: the search for the laws of self-organization and complexity*. Oxford university Press. 1995
- King, G.A.M., Was there a prebiotic soup? *Journal of Theoretical Biology*,1986,123, 493-
- King, G.A.M., Recycling, reproduction, and life's origin. *BioSystems*, 1982, 15, 89-97
- Korzeniewski B. Cybernetic formulation of the definition of life. *Journal of Theoretical Biology*, 209,275-286, 2001
- Koyré Alexandre. *Du monde clos à l'univers infini*. Paris : Gallimard Tel.,1973
- Koyré Alexandre. *Etudes d'histoire de la pensée scientifique*. Paris : Gallimard Tel.,1973
- Kunin V. A system of two polymerases-A model for the origin of life. *Origin of Life ans evolution of the Biosphere*, 30, 459-466, 2000
- Kupiec J-J., *L'origine des individus*. Paris : Fayard, Le temps des sciences, 2008
- Kupiec J-J., Lecointre G., Silberstein M., Varenne F., *Modèles, simulations, systèmes*. Collections «Matériologiques»,Editions Syllepse : 2008
- Kvenvolden K., Lawless J., Pering K., Peterson E., Flores J., Ponnampereuma C., Kaplan I.R., Moore C., Evidence for Extraterrestrial Amino-acids and Hydrocarbons in the Murchison Meteorite. *Nature* 228, 923-926,1970
- Lalande André, *Vocabulaire technique et critique de philosophie*. Presse Universitaire de France : 2006
- Lavabre-Bertrand Thierry. Le vitalisme de l'Ecole de Montpellier. *Repenser le vitalisme*. Dir. par Pascal Nouvel. Presses Universitaires de France, Science Histoire et Société, 2011
- Lamarck J.B. *Philosophie Zoologique*.1809. Disponible sur : gallica.bnf.fr / Bibliothèque nationale de France.
- Lamarck J.B. *Hydrogéologie*. 1802. Disponible sur : http://www.lamarck.cnrs.fr/ice/ice_book_detail-fr-text-koyre_lamarck-ouvrages_lamarck-8-1.html.
- Langton C.G., *Artificial Life I*, Addison-Wesley: 1989, p.1.
- Langton C.G., Studying Artificial Life with Cellular Automata », *Physica D*, 22, 1986
- Lalande André, *Vocabulaire technique et critique de philosophie*. Presse Universitaire de France : 2006
- Lazcano A, *Early Life on Earth*. Bengton S. editor, Columbia University Press, pp.60-69, 1994
- Lazcano A., Towards a Definition of Life : The Impossible Quest? *Space Science Reviews*, Volume 135, Nos 1-4, 2008.

- Leibniz. *Monadologie*.79. Disponible sur : <http://bibliotheque.uqac.quebec.ca/index.htm>
- Leibniz. *Discours de métaphysique*. §24. 1686. Disponible sur livres-et-ebooks.fr
- Lefebvre René. *Aristote zoologue*. Archives de Philosophies, 61, 1998
- Lecourt Dominique-direction-*Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences*. Presse Universitaire de France. Quagrige : 1999
- Lewontin R.C., The Units of Selection. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1970, Vol. 1, pp. 1-18
- Liard Louis. *Des définitions géométriques et des définitions empiriques*. Librairie philosophique de Ladrangé. 1873. Disponible aux éditions VIGDOR, 2002.
- Von Linné Carl. *L'Équilibre de la Nature*. Traduit par B.Jasmin. Paris : Librairie philosophique. J.Vrin, 1972
- Lifson S., On the crucial stages in the origin of animated matter. *Journal of Molecular Evolution*, 4, 1-8, 1997
- Lipton Peter. *Inference to the best explanation*. Second Edition, London: Routledge, 2004.
- Levisohn R., Spiegelman S., Further Extracellular Darwinian Experiments with Replicating RNA Molecules: Diverse Variants Isolated under Different Selective Conditions. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*. 1969, 63 : 805
- Locke John. *Essais philosophiques concernant l'entendement humain*. Paris : Vrin, Bibliothèque des textes philosophiques, 2001
- Loeb Jacques. *Forced movements, tropism and animal conduct*. Disponible sur : <https://archive.org/details/forcedmovementst00loeb>
- Loeb Jacques. *Proteins and The theory of colloidal behavior*. Disponible sur : <https://archive.org/details/proteinsthetheor00loebrich>.
- Lucrèce. *De la nature des choses*. (I, 265-292). Le livre de poche. Librairie Générale Française. 2002.
- Luisi Pier Luisi, *Defining the transition to life: self-replicating bounded structures and chemical autopoiesis*. Thinking about Biology, ed. By Stein W., Varela F.J., Addison-Wesley, New Jersey, 1993
- Luisi Pier Luisi, About various definitions of life. *Origin of Life and Evolution of the Biosphere*. 28,613-622,1998
- Luigi Pier Luisi, Autopoiesis: a review and a reappraisal. *Naturwissenschaften*, 90,2003
- Lwoff André, The Concept of Virus. *Journal of General Microbiology*, 1957, vol. 17, no 2
- Lwoff André., *Biological Order*, MIT Press, Cambridge, MA.1962
- Machery Edouard, Why I stopped worrying about the definition of life...and why you should as well. *Synthese*, 2012 , 185: 145-164
- Malaterre C. Lifeness signatures and the roots of the tree of life. *Biology & Philosophy*, 2010, volume 25, issue 4
- Malaterre C. On What It is to Fly Can Tell Us Something About What It is to Live. *Origin of Life and Evolution of the Biosphere*, 2010, 40:169
- Malaterre C. *Les origines de la vie : Emergence ou explication réductive*. Chapitre 1 : La vie et ses origines. P17. Paris : Hermann Editeurs, 2010
- Maturana et Varela. *Autopoiesis and cognition*. D. Reidel publishing company. Dordrecht, Holland, 1980.
- de Maupertuis Pierre Louis. *Venus Physique*. 1745. Disponible sur : [Gallica.bnf.fr](http://gallica.bnf.fr) / Bibliothèque Nationale de France.
- Maurel Marie-Christine. *Origines de la vie, originalité du vivant*. Nouveaux débats sur le vivant, coordonnés par M.-C. Maurel et P.-A. Miquel, Editions Kimé, 2003.
- Maurel Marie-Christine. L'avenir d'un passé très lointain. *Revue philosophique de la France et de l'étranger*, 2004/3, tome 129 : 277-283
- Maturana H.R., Valera F.J., *Autopoiesis and Cognition. The Realization of the Living*. Reidel D.,Dortrecht 1980
- Maynard Smith J., *The Theory of Evolution*. 3rd edition New York: Penguin, 1975
- Maynard Smith J., *The problems of biology*. Oxford University Press,1986
- Maynard Smith J.; Szathmary E., *The major transition in evolution*. Oxford University Press, 2007
- May Robert M., Hypercycles spring to life. *Nature* 353, 1991
- Mayr Ernst, Cause and effect in biology. *Sciences*. New series. 1959, Vol 134:1501-1506.
- Mayr Ernst, Histoire de la biologie. Diversité, évolution et Hérité. Fayard, 1989
- Mayr Ernst. *The Growth of Biological Thought: Diversity, Evolution and Inheritance*. Cambridge, Harvard University Press, 1982
- Mercer E.H., *The foundation of Biological Theory*. Wiley Intersciences, New York 1981
- de la Metrie Offroy Julien. *L'homme machine*. Edition de 1865. Disponible à : <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k6253039v>
- Mill J.S., *System of Logic, Ratiocinative and Inductive: Being a Connected View of the principles of evidence and the methods of scientific investigation*. 1843, Vol 1. Disponible sur : http://www.forgottenbooks.org/readbook_text/

- Miller Stanley L., A production of amino acids under primitive earth conditions. *Science*, 1953 117,528-529
- Miller Stanley L., Orgel L.E., *The origins of life on earth*. Englewood Cliffs, N.J: Prentice Hall 1973
- Model theory : plato.stanford.edu
- Molina Parez Alberto. *Techniques et concepts du vivant en biologie synthétique*. Ludus vitalis vol XVII num 31, 2009
- Molecular Biology of THE CELL*. Fourth Edition. Garland Science, 2002
- Monod Jacques. *Le hasard et la nécessité. Essai sur la philosophie naturelle de la biologie moderne*. Seuil, 1970
- Morange Michel. *Les secrets du vivant. Contre la pensée unique en biologie*. Sciences et société. Editions La Découverte, 2005
- Morange Michel. *La vie, l'évolution et l'histoire*. Odile Jacob Sciences, 2011
- Morange Michel. *Histoire de la biologie moléculaire. Le rôle des physiciens*. La Découverte/Poche 2003
- Moss L., *Deconstructing the gene and reconstructing molecular developmental systems*. In Oyama, S., Griffiths, P., Gray, R. (éds.): *Cycles of contingency, developmental systems and evolution*, London: MIT Press, 2001, pp. 85-97.
- Mossio Matteo, Saborido Cristian, Moreno Alvaro. *Fonctions : normativité, téléologie et organisation*. Dans : J.Gayon, A.de Ricqlès. *Les fonctions : des organismes aux artefacts*. Paris : Science Histoire et société, Presse Universitaire de France,2010
- Mossio M.,Longo G.,Stewart J., A computable expression of closure to efficient causation. *Journal of Theoretical Biology*. 2009
- Morowitz and al., The chemical logic of a minimum protocell. *Origins of life and evolution of the biosphere*, 1988, 18: 281-7
- Munteanu Andreea, Solea Richard V., Phenotypic diversity and chaos in a minimal cell model. *Journal of Theoretical Biology*, 2006,240 : 434-442
- Nagel Ernest. *The Structure of Science*. Routledge & Kegan Paul, 1961
- Needham. *Nouvelles observations microscopiques*. 1750. Disponible sur http://books.google.fr/books/about/Nouvelles_observations_microscopiques.html
- von Neuman J., *The general and logical theory of automata. Cerebral Mechanisme in behavior*. The Hixon Symposium, ed. By L.A. Jeffress, John Wiley, New York, pp.1-41, 1951
- von Neumann J. et Burks A.W., *The theory of self-reproducing automata*. University of Illinois Press Champaign, Illinois, 1966
- Newton Isaac. *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. General Scholium, troisième édition, 1726, page 943, traduction française par la Marquise du Châtelet.
- Nurse Paul , Yoshio Masui and cell cycle control, past, present and future. *Biology of the Cell*, 1998, 90 : 447-452
- d'Ockham Guillaume, Intuition et abstraction. Si le premier objet connu par l'intellect est le singulier ou l'universel. *Quodlibet* 1, question n°13.Vrin. Paris.2005
- Oparin A.I., *Life.Its Nature, Origine and Development*. Academic Press, New York and London, 1966
- Oparin A.I., *The Origin of Life on the earth*. Translated from the Russian by Ann Singe. New York: Academic Press Inc. Publisher, 1957. Disponible sur : <http://archive.org> ou <http://www.valencia.edu/~orilife/textos/The%20Origin%20of%20Life.pdf>
- Orgel L.E., The origin of polynucleotide-directed protein synthesis. *Journal of Molecular Evolution*, 1989, 29: 465-74
- Orgel, L.E., Evolution of the genetic apparatus. *Journal of Molecular Biology*, 1968, 38,381-93.
- Orgel L.E., *The Origins of Life : Molecules and Natural Selection*. John Wiley, New York, p.189, 1973
- Palyi Gyula, Zucchi Claudia, Caglioti Luciano. *Fundamentals of Life*. Elsevier, 2002.
- Pascal Blaise, *De l'autorité en matière philosophique. De l'esprit géométrique ; entretien avec M. de Sacy*. Paris : Félix Alcan Editeur, 1886. Disponible sur : [Gallica.bnf.fr](http://gallica.bnf.fr) / Bibliothèque nationale de France.
- Perret J., Biochemistry and bacteria. *New Biology* 12,68-69, 1952
- Pichot André. *Histoire de la notion de vie*. Paris : Gallimard, Collection Tel., 1993
- Portin Petter. Historical Development of the Concept of the Gene. *Journal of Medicine and Philosophy*.2002, Vol. 27, No. 3
- Popa Radu. *Between Necessity and Probability, Searching for the definition and origin of Life*. Berlin-Heidelberg : Springer, 2004
- Prigogine I., *From Being to Becoming*. Freeman W.,H., San Francisco, 1980
- Prigogine I., Stengers I., *Order out of Chaos*. Heinemann, London, 1984
- Prigogine Ilya ; Stengers Isabelle. *La Nouvelle Alliance*. Paris : Gallimard, Bibliothèque des sciences humaines, 1986
- Prigogine Ilya. *Etude thermodynamique des processus irréversibles*. Liège: Desoer, 1947.
- Pross Addy. *What is Life? How chemistry become biology*. Oxford University Press, 2012.

- Pross Addy. *Journal of Systems Chemistry*. 2011, 2:1. Disponible sur : <http://www.jsystchem.com/content/2/1/1>
- Putter A. cité dans: Van Bertalanffy L., *Modern Theories of Development : an Introduction to Theoretical Biology*. P.51, The Science Library, Harper and Brothers, New York 1933
- Rashevsky Nicolas, Topology and life: In search of general mathematical principles in biology and sociology. *Bulletin of mathematical biology*. 1954, 16 number 4 : 317-348
- Reisse Jacques. *La longue histoire de la matière*. Paris : Presse Universitaire de France, 2006
- Root-Bernstein R.S., Dillon P.F., Molecular complementarity I : The complementarity theory of the origin and evolution of life. *Journal of Theoretical Biology*, 18, 447-479, 1997
- Rosen Robert. *Life Itself. A comprehensive inquiry into the nature, origin, and fabrication of life*. New York Columbia University Press, 1991
- Rosen Robert. A note on replication in (M,R) systems. *Bul. Math. Biophys.* 1966, 28, 149-151
- Rosen Robert. On the dynamical realization of (M,R)-systems. *Bulletin of Mathematical Biology*. 1973, 35, Number 1-2.
- Rosen Robert, Further comments on replication in (M, R) systems. *Bull. Math. Biophys.* 1967. 29, 91-94
- Rosenberg Alexander. *Instrumental Biology or the disunity of Science. Chapter one: Biology as an instrumental Science*. The University Chicago Press, 1994
- Rueger Alexander. Perspectival Models and Theory. *British Journal for the Philosophy of Science*, 2005, 56
- Ruffié Jacques. *Traité du vivant*. Paris : Fayard, le temps des sciences, 1988
- Ruiz-Mirazo Kepa, Peretó Juli, Moreno Alvaro. A universal definition of life: autonomy and open-ended evolution. *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*. Kluwer Academic Publishers, 2004, 34: 323–346
- Ruffié Jacques. *Traité du vivant*. Paris : Fayard, le temps des sciences, 1982
- de Saint Hilaire Etienne Geoffroy. *Mémoire sur la théorie physiologique du Vitalisme et réponse à quelques objections*. Gazette médicale de Paris, II, 9., 62 ; 1831. <http://www2.biusante.parisdescartes.fr/livanc/>
- Sattler R., *Bio-philosophy*. Springer-Verlag, Berlin, 1986
- Van Segbroeck Sven, Nowe Ann, Lenaerts Tom. Stochastic Simulation of the Chemoton. *Artificial Life*, 15: 213–226.
- Shapiro R., *Origins: A skeptic's guide to the creation of life on Earth*. Bantam Doubleday, New York, 1987
- Schiex Thomas, λ -calcul dans « *Intelligence artificielle et informatique théorique* ». Toulouse, Cepadues-Editions, 2002
- Schrodinger Erwin, *Qu'est-ce que la vie ? De la physique à la biologie*. Paragraphe 57. Christian Bourgois Editeur, 1986
- Shulze-Makuch D. and Irwin L.N., *Life in the Universe: Expectations and Constraints* Springer Berlin Heidelberg, 2004
- Schuster P., *Evolution between chemistry and biology*. Origin of Life, 14, 3-14, 1984
- Segré D.; Lancet D., *Theoretical and Computational Approaches to the study of the Origin of Life*. Kluwer Academic Publishers, 2004
- Tierra home page : <http://life.ou.edu/tierra/>
- Sertorio L., Tinetti G., *Available energy for life on a planet, with or without stellar radiation*. DFTT, Italy, July 1-30, 2001
- Singer S.L., Nicholson Garth L. The Fluid Mosaic Model of the Structure of Cell Membranes. *Science* 18, 1972: Vol. 175 no. 4023 pp. 720-731.
- Simondon Gilbert. *L'individu et sa genèse physico biologique*. Presses Universitaires de France, 1964
- Stadler Peter F., Happel Robert. The Probability for Permanence. *Math.Biosc.* 1993, 113: 25-50
- Stahl Georg Ernst, *Différence entre mécanisme et organisme* (œuvres II 281 282). Texte dans Pichot A. Histoire de la notion de vie : L'animisme de Georg-Ernst Stahl.
- Starr C., Taggart R., *Biology : The Unity and Diversity of Life*. Wadsworth Publications Co.Inc., Belmont CA 1992
- Stengers I., *Quelles questions poser aux vivants ?* In « Comment définir la vie ». Ouvrage collectif dirigé par Hugues Bersini et Jacques Reisse. Paris : Vuibert, 2007
- Stewart J., Mossio M., *Is « Life » Computable? On the simulation of closure under efficient causation*. In Proceedings of the Fourth International Conference on Enactive Interfaces, 2007
- Strobel, S.A., Repopulating the RNA world. *Nature*, 2001, 411, 1003-6
- Spencer H., *The principle of biology*. Appleton D. and Co., New York 1884
- Spinoza. *Pensées Métaphysiques Deuxième partie*. Chapitre VI : de la vie de Dieu. Disponible sur : www.spinozaetnous.org/
- Strogatz S.H., *Nonlinear Dynamics and Chaos: with applications to Physics, Biology, Chemistry and Engineering*. Perseus Book, 2000
- Szathmari E., Demeter L. *Journal of theoretical biology*. 1987, 128:468-486

- Szostak J.W., Bartel D.P., Luisi P.L. Synthesizing life. *Nature*, 2001, 409,387-90.
- The First International Meeting on Synthetic Biology. *Synthetic Biology* 1.0, June 10 – 12, Cambridge M, 2004.
- Tarumi K.; Schwegler H. A non linear treatment of the protocol model by a boundary layer approximation. *Bulletin of Mathematical Biology*. 1984, 47 : 307-20
- Thomson D'Arcy. *Forme et croissance*. Seuil, Sciences ouvertes. 2009
- Tirard Stéphane. *Stéphane Leduc (1853-1939) De la médecine à la biologie synthétique*. Histoire des Sciences Médicales-Tome XLIII - N° 1 – 2009.
- Tirard Stéphane, Morange Michel, Lazcano Antonio. The definition of Life: A brief History of an Elusive Scientific Endeavor. *Astrobiology*, 2010, vol 10: 1003-1008.
- Treviranus Gottfried Rheinhold. *Biologie Oder Philosophie der Lebenden Natur für Naturforscher und Aertze*. Disponible sur : http://www.deutschestextarchiv.de/book/show/treviranus_biologie05_1818.
- Tsokolov Serhiy A., Why Is the Definition of Life So Elusive? Epistemological Considerations. *Astrobiology*, 2009, Volume 9, Number 4.
- Turian G., Origin of Life II. From prebiotic replicators to protocells. *Archives des Sciences*, 52,2,pp.101-109, 1999
- Varenne Franck, *Formaliser le vivant : lois, théories, modèles ?* Paris : Hermann Editeurs, 2010.
- Vilee C.A. et al., *Biology*. 2nd editon, Sounders College Publishing, 1989
- Virchow Rudolf. Alter und neuer Vitalismus, *Archiv für pathologische Anatomie und Physiologie und für klinische Medicin*. Springer, 1856, 9.
- Virchow Rudolf. *The Huxley Lecture on recent advances in Science and their bearing on medicine and surgery*. Delivered at the opening of the Charing Cross Hospital Medical School, 1898. <https://archive.org/stream/georgiajournal>.
- Virchow Rudolf. *Pathologie cellulaire*, ch. I, 1849, in : Georges Canguilhem, La théorie cellulaire, déjà cité.
- Virchow R., *Cellular Pathology*. In Disease, Life and Man : Selected Asays Stanford University Press, 1855
- Wächtershäuser G., Before enzymes and templates: theory of surface metabolism. *Microbiology Review*, 1988, 52: 452-84.
- White, H.B., Coenzymes as fossils of an earlier metabolic stage. *Journal of Molecular Evolution*. 1976, 7 : 101-4
- Wiener N., *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and in the Machine*. MIT Press, Cambridge MA, 1947
- Wittgenstein Ludwig. *Le Cahier bleu et le Cahier brun*. Collection Tel Gallimard, 1996 (trad. Française).
- Woese, C.R., *The genetic code*. New York : Harper & Row, 1967
- Wolfe Charles. La catégorie d'« organisme » dans la philosophie de la biologie. *Multitude* 16. 2004
- Wolper Pierre. *Introduction à la calculabilité*. Paris : Dunod, 2006
- Yang B.S. and al., *Optimum design of short journal bearings by artificial life algorithm*. Tribology International 34,427-435,2001