



UNIL | Université de Lausanne

Unicentre

CH-1015 Lausanne

<http://serval.unil.ch>

2021

Emergence synchronique et diachronique du vivant : un point de vue matérialiste et réductionniste.

Marc-André von Siebenthal

Marc-André von Siebenthal 2021 « Emergence synchronique et diachronique du vivant : un point de vue matérialiste et réductionniste. »

Originally published at : Mémoire de maîtrise, Université de Lausanne

Posted at the University of Lausanne Open Archive.
<http://serval.unil.ch>

Droits d'auteur

L'Université de Lausanne attire expressément l'attention des utilisateurs sur le fait que tous les documents publiés dans l'Archive SERVAL sont protégés par le droit d'auteur, conformément à la loi fédérale sur le droit d'auteur et les droits voisins (LDA). A ce titre, il est indispensable d'obtenir le consentement préalable de l'auteur et/ou de l'éditeur avant toute utilisation d'une oeuvre ou d'une partie d'une oeuvre ne relevant pas d'une utilisation à des fins personnelles au sens de la LDA (art. 19, al. 1 lettre a). A défaut, tout contrevenant s'expose aux sanctions prévues par cette loi. Nous déclinons toute responsabilité en la matière.

Copyright

The University of Lausanne expressly draws the attention of users to the fact that all documents published in the SERVAL Archive are protected by copyright in accordance with federal law on copyright and similar rights (LDA). Accordingly it is indispensable to obtain prior consent from the author and/or publisher before any use of a work or part of a work for purposes other than personal use within the meaning of LDA (art. 19, para. 1 letter a). Failure to do so will expose offenders to the sanctions laid down by this law. We accept no liability in this respect.



UNIL | Université de Lausanne

Mémoire de Maîtrise universitaire ès Lettres en Philosophie.

Philosophie des sciences

Session janvier 2021

**Emergence synchronique et diachronique du
vivant : un point de vue matérialiste et
réductionniste.**

Par Marc-André von Siebenthal

Sous la direction du professeur Christian Sachse

Et de l'expert Michael Esfeld

Table des matières

1. Avant-Propos.....	2
2. Partie Introductive.....	10
3. Causalité et ontologie : déterminisme, Hume, les pouvoirs et la structure dynamique du monde.....	18
3.1 Causalité, déterminisme, contingence et liberté d'un point de vue classique.....	19
3.2 Conflit entre intentionnalité et réductionnisme.....	23
3.3 Physique fondamentale, métaphysique naturaliste et complétude de la physique : éléments d'une vision scientifique du monde.....	27
3.4 Arguments critiques sur la notion de causalité : causalité Humienne et causalité de pouvoirs.....	29
3.5 Le fonctionnalisme et les sciences spéciales dans leur rapport à une ontologie primitive et une structure dynamique de l'univers.....	33
3.6 Rétrospective du chapitre.....	36
4. Les systèmes complexes, leurs éléments structurels par niveaux et l'émergence Synchronique.....	39
4.1 Biologie des systèmes, organicisme et systèmes complexes par rapport à l'émergence synchronique du vivant.....	41
4.2 Problèmes soulevés par l'imprédictibilité et l'inexplicabilité – l'émergentisme intégré au réductionnisme conservatif.....	43
4.3 Les réalisations multiples.....	48
4.4 Emergentisme et réductionnisme conservatif.....	51
4.5 Rétrospective du chapitre.....	52
5. Thermodynamique et flèche du temps : l'émergence diachronique.....	54
5.1 Inobservabilité et Thermodynamique.....	56
5.2 Auto-organisation et emergence dans les systèmes dynamiques.....	61
5.3 Le Temps, être et devenir.....	62
5.4 Le Temps dans les sciences : flèche du temps et hypothèse du passé.....	64
5.5 La complexité, la néguentropie, et la téléologie en biologie – l'émergence Diachronique.....	67
5.6 Systèmes complexes et information.....	71
5.7 Rétrospective du chapitre.....	76

6. Conclusion et perspective.....	78
7. Bibliographie	81

1. Avant-Propos

Ce travail a pour but d'éclaircir un angle d'approche particulier sur le réductionnisme en philosophie de la biologie, cette fois-ci autour de la question de l'émergence de la vie. Le choix du cas de l'émergence de la vie semble prometteur pour l'étude du réductionnisme ontologique et épistémologique, car il se situe à la charnière du monde des sciences fondamentales de la physique, du monde des sciences spéciales de la biologie ainsi que de leurs niveaux d'organisation de prédilection respectifs.

En effet, la vie biologique présente *des systèmes complexes* constitués de qualités épistémologiques et de fonctions que l'on n'observe pas d'un premier abord dans les conceptions physiques (par exemple les notions de fitness, reproduction, évolution...) et qui semblent avoir des *pouvoirs causaux* dans le monde. Ces effets causaux semblent se dédouaner de la stricte dynamique de la matière inerte et du *déterminisme* lorsqu'ils sont le fruit d'organisme, et notre sens commun semble vouloir accorder un rôle d'*agent* à la matière, passé un certain *niveau d'organisation*. Ce rôle d'agent attribué à la matière vivante semble mettre en péril la clôture causale de la physique, puisqu'il insinuerait des causes supplémentaires à celles de la physique. Il semble donc pertinent de s'intéresser à ces différents niveaux : cette matière vivante présente en effet *des dynamiques non-linéaires* qui mobilisent *ces niveaux d'organisations* à des niveaux hiérarchiques très variés, et qui semblent présenter des *structures synchroniquement émergentes* (par exemple le système immunitaire, l'écologie des populations...). Bon nombre de chercheurs prétendent pouvoir regrouper ces *dynamiques complexes* au sein d'une vision de la biologie qui serait systémique (*la biologie des systèmes*), et qui remettrait au goût du jour les thèses émergentistes. Par ailleurs, ces systèmes se déroulent dans des processus inscrit dans une durée, et défient des notions fondamentales de la physique par exemple l'entropie. Ces *processus* et ces *évolutions complexes* qui semblent parfois être en porte-à-faux avec des principes physiques (par exemple *la néguentropie*, la notion de *flèche de la complexité évolutive* ou *d'entropie informationnelle*), émergent *diachroniquement* et semblent mettre en lumière une notion de progression, comme une forme de tendance de la matière vers la complexité. En conséquence, certains seraient tentés d'introduire des notions proches de la *téléologie* dans l'émergence de ces processus complexes.

Ces trois éléments principaux, à savoir les *pouvoirs causaux*, les *structures synchroniquement émergentes* ainsi que les *processus diachroniquement émergents* seront les objets d'études principaux de notre travail. Il s'agira d'approfondir et de critiquer la notion de sens commun d'*agent* (qui peut prétendre rompre la *clôture causale* de la physique), la *biologie des systèmes* (qui tente de rompre avec le *réductionnisme* en adoptant une forme d'*émergentisme*) et la *téléologie dans les processus* (qui tente de discerner un *design* dans ces processus). Se posera donc la question du *déterminisme* et de l'*indéterminisme* de l'évolution de la matière inerte et vivante dans le monde afin de nuancer la compréhension que l'on se fait de la *causalité*, ce qui nous donnera une base pour s'attaquer aux questions des systèmes complexes synchroniques et diachroniques. Par ailleurs, ressortira la question du point de vue de l'humain en tant que tel, car nous essayons effectivement de comprendre l'univers bien qu'étant inscrit au sein de son propre déroulement, ce qui nous force à

nous poser la question d'une part de notre place au sein de celui-ci, et d'autre part de la validité de nos investigations et conclusions à son propos.

Cette étude se fera tout d'abord sous l'angle du matérialisme le plus stricte, en essayant de partir d'une forme succincte d'*ontologie primitive* du monde compréhensible, sur laquelle il sera possible d'articuler les notions d'*ontologie* et d'*épistémologie* (tous ces termes seront définis plus bas), puis des pistes de réflexion seront proposées pour pondérer cette vision matérialiste.

Bien entendu, il faut d'abord éclaircir ce qui est suggéré par l'emploi du terme « matérialisme », car il existe plusieurs façons de le comprendre. Ce dernier a en effet été galvaudé et assimilé péjorativement de nos jours, entre autres, à l'amour de l'argent et aux choses terrestres ou sensuelles, alors que dans notre travail nous essaierons plutôt de l'assimiler à une forme de doctrine épistémologique et ontologique que l'on construit à propos de l'Univers. Parmi les moyens possibles de définir cette doctrine nous choisirons, pour appuyer notre travail, la définition du matérialisme qui stipule que : « *les entités constitutives du monde sont matérielles, autrement dit il n'existe pas d'entités immatérielles en tant que constituants*¹ ». Bien entendu, une telle approche pencherait donc plus pour une « vision scientifique du monde » que pour une « vision manifeste² », mais il ne s'agira pas dans ce travail d'approfondir spécifiquement ce débat, ni de trancher dans le sens d'une *vision scientifique du monde* au détriment de la *vision manifeste* du monde (tels que les définit Sellars), bien que les enjeux soient très passionnants. En fait, pour des raisons pratiques, l'angle favorisé sera celui d'une *vision scientifique et objective du monde*, mais certains arguments pouvant mettre en avant une vision autre du monde seront avancés, pour pondérer l'approche strictement matérialiste et pour offrir des pistes de réflexion annexes sur notre manière de comprendre le monde. En effet, des questions et des critiques émergent toujours contre une approche matérialiste, et il semble qu'il ne sera pas possible de les mettre de côté, comme nous le verrons plus bas : « *Le matérialisme – outre la question toujours posée de son statut: ontologique, épistémologique, méthodologique – nécessite l'examen des options ontologiques et épistémologiques connexes que sont principalement le réalisme, le déterminisme, le réductionnisme et l'émergentisme*³ », ces questions de *déterminisme* et de *réalisme* émailleront effectivement les chapitres de notre travail, mais en second plan, après que les angles les plus matérialistes soient éclaircis. En effet, puisque notre objet d'étude est avant tout à la jonction de l'inerte et du vivant, il semble approprié de ne se focaliser que sur les dimensions matérialistes dans une première phase, puis d'aborder les considérations qui en découlent éventuellement qu'en deuxième phase. En outre, l'angle matérialiste semble prometteur car il part du principe que ces « entités constitutives » peuvent être étudiées afin de parvenir à une explication du monde en tant que tel, et que l'on pourrait, par leur étude, formuler une forme de *métaphysique naturelle* qui serait à même de fournir une description de l'univers tel que nous le voyons, dans sa dynamique et dans son ontologie. Bien sûr, cet optimisme peut rencontrer de nombreuses réserves (notamment le problème de la liberté, ou de la place de l'humain au sein de ce mécanisme), et il s'agira dans ce travail de comprendre certains points de vue plus critiques envers la suprématie de ce matérialisme.

¹ SILBERSTEIN M., « Introduction, l'unité plurielle du matérialisme », p.9

² Pour plus de détails sur la « vision scientifique du monde » et la « vision manifeste », voir SELLARS W., « Philosophy and the scientific image of man ».

³ Silberstein M., « La fonction architectonique du matérialisme », p.13

En effet, des critiques peuvent sembler légitimes. Car en l'état actuel des choses, on constate les deux éléments suivants : la Nature semble se présenter à nos yeux sous une forme unie (il n'y a qu'un seul monde dans lequel nous conduisons des expériences), tandis qu'il existe une multitude de sciences qui essaient de la décrire. Nous avons donc, face à un monde et une Nature qui semblent unifiés et uniques, un appareil épistémologique désuni, multiple et disparate. Ce besoin d'unifier le monde et les sciences n'est pas ancien, comme le dit Schrödinger « *nous avons hérité de nos ancêtres une invincible prédilection pour les connaissances unifiées et universelles*⁴ », et nous verrons dans notre travail que la relation qu'a entretenue l'humain par rapport à la Nature a beaucoup évolué à travers l'histoire. En fait, comment prétendre que notre vision du matérialisme et du monde soit fiable, s'il existe un tel fossé entre notre appareil scientifique et le monde ? Ainsi, « *we therefore still face the issue of the unity of nature and the unity of science today*⁵. » S'en suit un grand dilemme : soit le monde peut être scientifiquement unifié, dans les sciences physiques puisqu'elles sont les plus fondamentales, et « *all causal interactions that there are in the world completely come under the laws of fundamental physics*⁶ » (on en déduit donc une vision réductionniste), soit les domaines abordés par les sciences spéciales jouissent d'un statut différent, et se démarquent de la physique par un phénomène d'*émergence* (et on en déduit donc une vision non-réductionniste). En somme, on pencherait soit pour un physicalisme réductionniste, soit pour un émergentisme qui échapperait à cet éliminativisme.

Pourtant, le monde biologique est ontologiquement lié à la physique : on ne peut pas prétendre que les êtres vivants ne soient pas constitués d'atomes ou de particules. Il s'agira donc de s'intéresser à ces rapports entretenus entre physique et biologie, en se focalisant sur le moment « T » où cette distinction épistémologique s'est opérée, et à partir de laquelle la science spéciale de la biologie a « commencé » à avoir un objet d'étude concret. En fait, des notions comme *émergence* et *réductionnisme* s'appliquent très clairement au cas de l'émergence de la vie, puisqu'on observe à partir de cet événement une organisation « originale » de la matière physique, de laquelle ses « fonctions » ont comme semblé émerger. Mais, comme dit plus haut, ces deux notions (émergence et réductionnisme) semblent paraître contradictoires d'un premier abord. Il s'agira dans ce travail de nuancer la compréhension que l'on peut avoir de ces deux termes : le réductionnisme n'est pas forcément *éliminativiste*, et le principe d'émergence n'est pas forcément *antimatérialiste*. En outre, se posera la question de leurs rapports causaux. En effet, comment la causalité peut-elle être comprise, dans le cas où des structures d'un premier abord différentes, semblent vouloir décrire un même phénomène ? En effet, l'unicité du monde semble impliquer une forme d'unicité explicative, qui semble devoir impliquer une unicité dans ses rapports causaux. Par ailleurs, ces rapports causaux semblent se manifester à des niveaux d'organisations différents. Que signifient ces « niveaux d'organisation », et quelles implications ont-ils dans notre compréhension des rapports causaux, de l'épistémologie et de l'ontologie du monde ? Ils semblent s'organiser selon un rapport structurel et dynamique particulier, qu'il s'agira d'explorer. En outre, cette dynamique semble faire cas de rapports causaux et fondamentalement nouveaux par rapport à la physique, et ce dans leur processus d'apparition. Comment devons-nous donc penser *le Temps* en tant que tel, et comment pouvons-nous l'intégrer dans une vision matérialiste qui fasse écho à nos principes fondamentaux ?

⁴ Schrödinger E., in *Qu'est-ce que la vie ?*

⁵ Esfeld & Sachse, *Conservative Reductionism*, p. 1

⁶ *Ibidem*, p. 1.

En somme, Il s'agira donc de proposer une manière de comprendre le rapport que la biologie peut entretenir avec la physique d'un point de vue du réductionnisme et de l'émergence, à propos du cas de l'apparition de la vie selon trois manières : 1) d'un point de vue *causal* et ontologiquement fondamental d'abord afin de saisir les liens existant entre le *déterminisme causal* du monde et le rôle des *agents* vivants au sein de celui-ci , puis 2) dans les rapports *structurels* entre les *niveaux d'organisations* où ces dynamiques s'opèrent afin de comprendre le rôle causal de ces niveaux d'un point de vue *fonctionnel*, enfin 3) dans le *Temps* et la durée dans lesquels ces phénomènes se manifestent, afin de comprendre comment la notion d'émergence s'inscrit dans un déroulement au fil duquel ces structures ont pu émerger.

Mais on n'y trouvera pas une exploration complète à 360° des problématiques de l'émergence et du réductionnisme, qui ont déjà largement agité le monde académique, ni une conclusion absolue sur ces problèmes (si tant peu qu'il soit possible d'en apporter en l'état actuel des choses). Il ne s'agira pas non plus d'établir des *bridge-laws* ou des *formalismes* possibles entre les ensembles d'énoncés logiques de la physique ou de la biologique, ni de savoir comment ces « *lois naturelles devraient être découvertes empiriquement, par les efforts des chercheurs*⁷ ». Il n'y a donc aucun projet de formalisation dans ce travail. Il reste néanmoins possible de proposer une approche qui puisse mettre en relief le réductionnisme dit « conservationniste » que nous appliquerons sur ce cas très particulier qu'est l'émergence de la vie. Cette approche se fera donc d'un point de vue strictement philosophique, sans avoir la prétention d'apporter une quelconque réponse d'ordre épistémologique et scientifiquement empirique. En effet, il est difficile de proposer un modèle qui puisse fédérer l'ensemble des scientifiques, car les données empiriques nous manquent sur la question spécifique de l'émergence de la vie. Le sujet est donc ouvert à de nombreuses spéculations et il est donc difficile d'établir une méthodologie ainsi qu'une épistémologie fiable et conclusive à son propos.

C'est précisément parce que cet événement de l'émergence du vivant est controversé, qu'il s'agira dans notre travail, avant tout, de se poser la question : est-il seulement possible de se poser des questions pertinentes sur l'origine de la vie ? En effet, certains défenseurs de la *systems biology* avancent que les dynamiques propres à la vie ne sont pas réductibles à leurs constituants : pour eux, « le Tout est supérieur à la somme de ses parties » (holisme), et les théories physiques ne sont d'aucun secours pour expliquer ces phénomènes. Mais si la biologie se distingue ontologiquement de la physique par l'émergence de qualités nouvelles, est-il seulement possible d'affirmer que la physique fondamentale possède un « pouvoir de causalité » tel qu'elle puisse proposer une compréhension cohérente du réel par une *métaphysique naturaliste*, et à travers cela une conception du phénomène de la vie ? Quant à ces *systèmes complexes* utilisés pour revendiquer un statut nouveau à la biologie, n'en trouve-t-on pas non plus des similaires en physique, dont l'appareil épistémologique en comprend la *non-linéarité* ? En outre, si le « pouvoir de causalité » de la physique est remis en cause, quelles en sont les conséquences pour notre conception de la cosmologie et de l'émergence du vivant ? En fait, il serait étrange de comprendre l'émergence du vivant, soit le premier instant où la biologie a commencé à avoir un sens, comme étant un phénomène uniquement explicable par la biologie. Si l'émergence de la vie se produit sur des phénomènes ontologiquement fondamentaux, alors les sciences fondamentales

⁷ Nagel, *op. cit.*, 1961, chapitre 11 ; Fodor, *op. cit.*, 1974, cité par Charbonneau, « Le réductionnisme scientifique et le matérialisme éliminativiste », p. 10

doivent pouvoir expliquer ce phénomène, sans avoir à faire recours aux conceptions *complexes* propres à la biologie. Cet instant charnière devrait donc être en principe compréhensible à travers des conceptions physiques, et c'est en partie ce que nous tenterons de montrer dans ce travail.

Ainsi, partant de considérations « simples » et parcimonieuses, telles que celles mises en avant par la recherche d'une *ontologie primitive* en physique, il serait possible de remonter étapes par étapes jusqu'au cadre de la vie. Cette approche n'est pas nouvelle, Schrödinger avait bien mis en avant l'existence d'un lien existant entre les sciences physiques et biologiques ; l'étude de cette dernière aurait permis l'identification d'éléments de réflexions nouveaux profitables à cette première :

« ... le domaine du vivant, sans échapper aux « lois de la physique » telles qu'elles sont aujourd'hui établies, est susceptible d'impliquer « d'autres lois de la physique » jusqu'ici inconnues et qui pourtant, une fois révélées, deviendront partie intégrante de la science tout autant que les précédentes⁸. »

Parmi ces « autres lois de la physiques inconnues » que le vivant nous aiderait à faire ressortir, on peut citer celles entre autres qui défient carrément nos conceptions fondamentales en physique, par exemple *la thermodynamique*. Pour Schrödinger, « *La vie paraît être un comportement ordonné et réglementé de la matière, comportement qui n'est pas basé exclusivement sur sa tendance de passer de l'ordre au désordre, mais basé en partie sur un ordre existant qui se maintient*⁹ ». Il semble y avoir un décalage entre un principe fondamental (le désordre de l'entropie) et la vie, qui présuppose une forme d'ordre, ou de mise en ordre. En effet, la vie semble faire étalage de systèmes *néguentropique* capables de défier le deuxième principe de la thermodynamique (cela sera approfondi dans la partie 5 de notre travail). Il a fallu donc comprendre la thermodynamique comme un système global où les échanges induisaient une augmentation de l'entropie à l'échelle universelle, plutôt que juste sur des corps particuliers : ce constat nous pousse à recadrer nos conceptions physiques et à les détailler d'une manière plus rigoureuse. En fait, le domaine du vivant rend saillant des dynamiques structurelles hautement complexes, qui doivent en conséquence être mises en rapport avec nos conceptions les plus fondamentales, pour que nous puissions mieux comprendre l'ordonnement de notre vision du monde. Etudier le vivant, c'est mettre au défi nos conceptions fondamentales, ce qui ne peut que galvaniser les progrès dans tous les domaines de nos recherches.

Pour Lechermeier, il s'agit d'élaborer « une théorie aboutie du vivant » qui permettrait, par l'étude de la matière, de son organisation et de ses développements, de caractériser la « *singularité du vivant, de sa structure matérielle organisée que nous reconnaissons si aisément comme relevant d'un même air de famille*¹⁰. » Il faudrait en fait se constituer une vision claire de ce qu'est le vivant, car en effet pour nous-autres en tant qu'individus, le vivant semble être un apriori donné tel quel par la Nature : le foisonnement de ses formes de manifestations pourrait dérouter le chercheur en le faisant se perdre dans des détails descriptifs. Sauter à pieds joints dans l'océan de concepts présentés d'un premier abord par le monde de la biologie peut sembler risqué : on risquerait de se noyer sous l'énorme quantité de données que le monde

⁸ Schrödinger, *Qu'est-ce que la vie ?* chapitre 6.

⁹ *Ibidem*.

¹⁰ Lechermeier G., « Penser la singularité du vivant dans un cadre matérialiste », p. 5

biologique offre à nos sens et à notre raison. Il faudrait donc choisir un angle d'approche bien spécifique et restreint, mais malgré tout à même de révéler un maximum d'éléments pertinents. Partir de son articulation ontologiquement liée à la physique, et donc partir d'une base fondamentale peut sembler plus prudent, afin de faire en sorte que le monde soit « *offert à la sagacité inventive des biologistes* », et pour qu'ils puissent « *en caractériser les propriétés, en préciser les mécanismes intimes, en saisir l'articulation avec l'ordre physico-chimique* », pour *in-fine* « *en livrer ce qui, au-delà de ces descriptions fines, en révélerait le fondement de sa singularité*¹¹. » Il semble indispensable donc de s'attaquer au problème par le moment où la vie est à son stade le plus primitif : analyser le vivant avant le seuil Darwinien permet d'éviter les écueils de la théorie de l'évolution, en ne se focalisant que sur les « briques » de son architecture la plus fondamentale. Ce serait en somme la recherche de la différence entre inerte et vivant « par en bas » (*bottom-up*), de tenter de voir si cette différence s'exprime en degrés liés à la complexité croissante en structure et dans le temps, tout en s'accrochant à une vision matérialiste pouvant rendre compte de l'unicité du monde qui se donne à nous :

« *En rendre compte nécessite d'aller au-delà des descriptions pour livrer la raison même de cette diversité et de cette unité. C'est tenter d'en produire la théorie permettant de rendre compte de deux choses : de la logique d'organisation sous-jacente qui rend possible l'expression des propriétés vitales, ainsi que de l'avènement de ces organisations matérielles qui au bout d'un certain stade de développement seront qualifiables de vivantes*¹² ».

En somme, il s'agira dans ce travail de justifier la capacité de la physique à expliquer le phénomène de l'émergence de la vie, afin de défendre une *métaphysique naturaliste* qui puisse rendre compte de l'état du monde réel de manière cohérente et scientifiquement fondée. Comme objet d'étude, nous prendrons le cas de l'émergence de la vie, car cet événement présente 3 caractéristiques clés qui font écho avec nos 3 objectifs mentionnés plus haut, pour améliorer notre compréhension du réel : Tout d'abord, l'émergence de la vie se situe à la *jonction épistémologique* qui existe entre les sciences fondamentales et les sciences spéciales de la biologie, car c'est à partir de cet événement que la biologie obtient son « objet d'étude » concret. Mais il est vrai que l'on peut étudier le monde pré-biotique à travers certaines conceptions liées à la biologie (*auto-composition, auto-organisation, robustesse, auto-replication* etc...), c'est pourquoi nous nous poserons la question d'identifier si oui ou non il est possible d'établir une limite claire entre les domaines respectivement étudiés par la biologie ou par les sciences fondamentales. Ensuite, l'émergence de la vie présente le moment où les niveaux d'organisations se sont le plus complexifiés (un cristal ou un ouragan, bien que complexes, semblent plus « simples » que n'importe quel procaryote), jusqu'à atteindre un point où de sévères critiques épistémologiques entendent revendiquer un *statut ontologique* presque nouveau, statut qu'il s'agira de discuter. Enfin, l'émergence du vivant s'est produite dans le temps, il faut donc comprendre cette historicité et ce rapport avec les processus et la durée. S'intéresser à ces questions participerait donc à nous présenter une vision cohérente et scientifiquement fondée du monde réel, puisque l'on pourrait comprendre le lien particulier que l'histoire complexe et spéciale du vivant (l'émergence du vivant et son Evolution), entretient avec l'histoire fondamentale présentée par la physique (depuis le Big-Bang). Cette approche, qui consiste à

¹¹ *Ibidem*, p. 6

¹² *Ibidem*, p. 8-9

considérer le vivant comme « *élément matériel et comme objet inséré dans le monde par sa matière même*¹³ » semble à la fois fructueuse et ouverte, comme le suggère Lechermeier :

« *Fructueuse car elle pousse à rechercher les articulations adéquates des phénomènes vivants avec les principes explicatifs de la matière qui constitue fondamentalement les êtres vivants. Ouverte car la recherche de ces articulations s'inscrit dans une démarche d'interrogations et de pratiques qui ne visent pas nécessairement à réduire la biologie en éliminant tout ce qui a trait à la singularité du vivant*¹⁴ ».

Au niveau de la structure, ce travail est donc divisé en trois parties, elles-mêmes constituées de sous-parties. Chacune des parties mêlera des notions scientifiques et philosophiques.

La première traite des considérations sur *la causalité*. Bien dégager le principe de causalité nous assurera une base sûre et fiable, à partir de laquelle l'on pourra s'interroger sur les caractéristiques complexes mises en avant par les sciences spéciales. Par ailleurs, les notions de *causalités* et de *déterminisme* étant liées, il semblerait intéressant de relever comment l'être humain se situe par rapport à ces conceptions, et de mettre en avant l'importance du lien existant entre *probabilité* et *causalité*. Une fois la causalité en tant que telle comprise et acceptée, il sera plus aisé de s'intéresser aux systèmes complexes, dont les rapports interrelationnels semblent défier notre conception causale du monde. En outre, ce rapport causal détaillé est compris comme un fonctionnalisme par sous-type¹⁵ ; il semblera plus aisé d'articuler une ébauche « d'ontologie primitive » solide sur laquelle nous pourrions en déduire une structure dynamique et continuer nos investigations. De cette vision clarifiée de l'ontologie du monde, il sera plus aisé d'aborder les systèmes complexes et les considérations émergentistes qui y affèrent.

La deuxième partie aborde donc ces *systèmes complexes*, en évalue le rapport causal entre les niveaux d'organisation de la matière, et tente de montrer leur intérêt épistémologique tout en les réduisant ontologiquement à la physique. Cela permettra de comprendre comment les systèmes décrivant l'origine de la vie se voient comme étant cohérents avec notre conception scientifique du monde. En fait, il s'agira de comprendre *l'émergentisme structurel synchronique*, mais à la lumière de l'ontologie primitive et du fonctionnalisme par sous-type. Par ailleurs, il s'agira aussi de montrer comment l'émergentisme peut être clarifié dans le but de l'intégrer au réductionnisme conservatif.

La troisième partie, enfin, abordera les notions de temps et de processus. En effet, le vivant s'inscrit dans une historicité de l'Univers et occupe donc une place particulière au sein de celui-ci. Il s'agira de s'interroger sur les notions de temps en physique, de leur rapport avec l'émergence du vivant : cela devrait nous permettre de mieux contextualiser le vivant en tant que tel. En somme, il s'agira de mettre en

¹³ *Ibidem*, p.8

¹⁴ *Ibidem*

¹⁵ Pour le réductionnisme conservatif et le fonctionnalisme par sous-types, voir Esfeld M. & Sachse C., *Conservative Reductionism*.

lumière certains aspects de *l'émergentisme diachronique*, en essayant de le rattacher aux notions physiques fondamentales connectées au *temps*.

Ainsi, le phénomène d'apparition de la vie, bien qu'à priori considéré comme complexe, semble tout à fait identifiable (par ses relations causales), à la physique fondamentale. Enfin, la conclusion reprendra ces éléments (causalité, systèmes complexes) pour dégager des pistes de réflexions, notamment sur les notions de *déterminisme*, de *hasard*, de *téléologie* et de *vision manifeste du monde*.

2. Partie Introductive

« *Ignoramus et ignorabimus*¹⁶ ». C'est en ces termes que s'exprimait le physiologiste Emil du Bois-Reymond dans son discours sur « Les limites de la connaissance humaine » lorsqu'il évoquait sept problèmes qui seraient, selon lui, à jamais insolubles. Parmi ces sept problèmes figurait celui de « l'origine de la vie¹⁷ ». Il s'agira dans ce travail de tenter de voir si, un siècle et demi plus tard, le problème de cette origine du vivant reste toujours insoluble et insondable. En effet, les progrès en sciences et en mathématiques en général ont été très conséquent depuis que ce discours a été tenu à Leipzig, en août 1872, et il semble possible de refaire un tour de la question. Par ailleurs, David Hilbert avait repris cette expression d'« *ignorabimus* » en tentant de s'opposer à ce pessimisme scientifique (« *wir müssen wissen. Wir werden wissen* » déclare-t-il dans le même discours¹⁸), par le biais de son célèbre programme mathématique éponyme¹⁹... qui se solda par un échec : Kurt Gödel, avec son fameux *théorème d'incomplétude*, avait mis court aux espérances de Hilbert et avait donc démontré un mur infranchissable en mathématiques. Mais qu'en est-il de la biologie et de la question sur l'origine de la vie ? Il semble que depuis Emil du Bois-Reymond, plusieurs tentatives et découvertes clefs ont permis de mieux distinguer le vivant. L'avènement de la *biologie moléculaire* tout d'abord, puis la découverte de la *génétique* a accéléré l'identification de la biologie à la physique, et pour le moment aucun « *Kurt Gödel de la biologie* » n'est venu stipuler l'impossibilité de comprendre le vivant et son émergence. Au fur et à mesure des avancées théoriques, empiriques et technologiques, la *Vie* semble révéler de plus en plus de secrets, et aujourd'hui, plusieurs théories prometteuses tentent d'expliquer certains aspects de son apparition²⁰. Elles « *tentent* » de l'expliquer en effet, car il est difficile d'observer et de comprendre un événement qui s'est déroulé il y a de cela 4 milliards d'années.

Car la biologie, tout comme la cosmologie ou l'Histoire, est une discipline avec une très forte part *diachronique*, c'est-à-dire qu'elle est liée à l'évolution dans le temps. Ces disciplines diachroniques et leur objet d'étude ne se déroulent « qu'une fois », et il est par conséquent impossible de constituer des groupes témoins pour conduire des analyses probabilistes ou statistiques et empiriques de ces phénomènes en les comparant : le seul groupe témoin, c'est l'Univers qui se manifeste à nos yeux et à nos instruments. En effet, nous ne pouvons pas réitérer la création de l'Univers en recréant un Big Bang d'observation, nous ne pouvons pas réitérer les processus évolutifs en recréant par exemple l'évolution des dinosaures à des fins d'observation, tout comme nous ne pouvons pas recréer l'épopée d'Alexandre le Grand pour en comprendre les

¹⁶ Traduit du latin par « nous ne savons pas et ne saurons jamais »

¹⁷ Les sept problèmes étant selon lui : 1) la nature de la matière et de la force, 2) l'origine du mouvement, 3) l'origine de la vie, 4) l'apparente téléologie de la nature, 5) l'origine de simples sensations, 6) l'origine de l'intelligence et du langage, 7) le libre arbitre.

¹⁸ Traduit de l'allemand par : « Nous devons savoir, nous saurons ». Pour un enregistrement du discours, voir lien, consulté la dernière fois le 14.12.20 : <http://archive.wikiwix.com/cache/index2.php?url=http%3A%2F%2Fmath.sfsu.edu%2Fsmith%2FDocuments%2FHilbertRadio%2FHilbertRadio.mp3>

¹⁹ Le Programme de Hilbert avait comme projet d'assurer les fondements des mathématiques.

²⁰ Pour voir des théories en rapport à cette apparition, consulter: Dodd M. & co, « Evidence for Early Life in Earth's Oldest Hydrothermal Vent Precipitates » et Nutman A. & co, « Rapid Emergence of Life Shown by discovery of 3700-million-year-old microbial structures ».

implications ou l'intérêt historique. Nous sommes parties prenantes de ces processus et comme inscrits à l'intérieur : nous sommes, pour ainsi dire, directement inclus dans l'expérience. Mais bien que l'on ne puisse pas observer cette évolution dans le temps, nous avons accès, dans l'instant présent, à tout un éventail d'éléments et de traces qui témoignent du passage de ce temps : témoins vivants d'aujourd'hui qui montrent la richesse de l'évolution biologique dans son aboutissement, et témoins fossilisés qui attestent de nombreux développements dans le passé et qui en préservent les traces. D'après Lechermeier, l'enjeu paraît simple :

« Partant des connaissances fines, précises, détaillées sur les vivants actuels, acquises à travers les résultats développés dans le cadre des sciences de la vie, éclairées par des données paléontologiques, et qui permettent de cerner ce qui au niveau matériel le plus fin constitue leur substrat commun, on devrait disposer des données permettant de dépasser le simple jeu de corrélations répétées et constantes entre la matière ainsi caractérisée et phénomènes vitaux²¹. »

Il serait donc possible, en avançant minutieusement, de retracer la singularité du vivant et d'en explorer les origines, en étudiant soigneusement ses traces laissées dans *l'histoire* ainsi que dans ses différents *niveaux d'organisation*. Car en effet, lorsque l'on observe la nature, elle semble se présenter à nous à travers des *niveaux d'organisations*. Ainsi, on admet que les atomes forment des molécules, qui elles même forment des cellules, qui forment des organismes, lesquels peuvent enfin former des populations ou des écosystèmes. On observe aussi que des relations particulières peuvent s'opérer entre ces niveaux, et les conceptions qui sont liées autour de ces relations sont parfois attribuées à des notions *d'émergence*.

Levels of existence

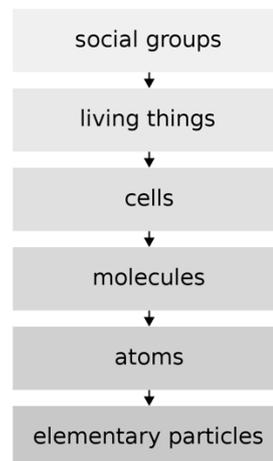


Schéma de classification hiérarchique des niveaux d'organisation (ou d'existence) décrit par Oppenheimer et Putnam²²

Au fil de ces niveaux d'organisations et de leurs interrelations, un événement certainement majeur s'est produit : *l'émergence* du vivant. On ne sait pas vraiment à quel seuil critique ou à quels niveaux de complexité il a fallu qu'elle se trouve, mais il

²¹ Lechermeier G., « Penser la singularité du vivant dans un cadre matérialiste », p. 5

²² Voir Kim, *3 essais sur l'émergence*

n'empêche que la matière s'est « organisée », et qu'elle a produit un « saut qualitatif » la faisant passer d'un stade « pré-biotique » à un stade « biotique ». Ce que l'on appelle communément « la vie » a donc fait son apparition, sans que l'on se sache exactement comment. Mais on en mesure les effets et les conséquences, il suffit simplement de regarder par sa fenêtre et d'observer : des arbres, des humains, des animaux variés interagissent entre eux et peuplent leur environnement ; la surface de la terre grouille d'une vie foisonnante. Mais le spectacle de cette vie fascinante, si riche et si variée, n'est pas une merveille réservée aux poètes ou aux contemplateurs. En effet, ce spectacle n'a pas endormi la frénétique quête de savoir qui anime les Hommes. Depuis l'aube des temps, on s'interroge : peut-on comprendre et systématiser la vie (tel qu'essayait de le faire par exemple Aristote dans *L'Histoire des animaux*), et verrons-nous un jour arriver un « *Newton du brin d'herbe*²³ », capable d'en expliquer tous les fondements et les secrets ?

Cette volonté de dévoiler les secrets, ou « quête de la vérité », qu'on attribue d'ordinaire à la science, est d'autant plus cruciale que c'est de *nous* dont elle parle, en tant qu'*espèce humaine* et vivante. Pour Poincaré, « *La recherche de la vérité doit être le but de notre activité ; c'est la seule fin qui soit digne d'elle*²⁴. » Comprendre clairement la vérité de notre origine en tant qu'être vivant, c'est potentiellement aussi comprendre notre manière de *vivre* au sens figuratif. Car la *vérité morale* et la *vérité scientifique* sont liées, « *Toutes deux (ces vérités) ne sont jamais fixées : quand on croit les avoir atteintes, on voit qu'il faut marcher encore, et celui qui les poursuit est condamné à ne jamais connaître le repos*²⁵ ». En tant qu'humains aujourd'hui, nous tentons d'appréhender le monde de la manière la plus objective possible, dans le but de rendre compte d'une réalité qui soit la plus scientifique possible. Mais cette quête incessante, que l'intelligence et la raison humaine s'attèlent à parachever, a pour base de départ un substrat humain : c'est avec nos yeux et nos sens d'humains, issus de la matière de l'univers, que nous essayons de comprendre notre matrice. Le savant ou le penseur qui tente de déchiffrer le code de la réalité universelle dans ses fondements et dans son ontologie fondamentale se heurte nécessairement, à un moment ou à un autre, à ses propres limites humaines, à ses propres concepts ; mais « *ce n'est pas la nature qui nous les impose (ces concepts), précise Poincaré, c'est nous qui les imposons à la nature*²⁶ » et il ajoute : « *C'est nous qui les imposons à la nature parce que nous les trouvons commodes* ». Ainsi, paradoxalement, notre vision scientifique se heurte au mur même de notre propre raison : ce sont nos *préjugés* et nos *conventions intellectuelles* qui nous guident ultimement ; notre quête de vérité objective et de vérités morales fonctionne donc en tandem.

Ainsi dès l'Antiquité, de l'occident à la Chine, on formule des théories à propos de l'origine du vivant et de son apparition : ces ébauches et ces théories témoignent à la fois de cette volonté d'expliquer le monde, et de notre condition d'être humain culturellement situé dans une époque et un lieu donné. Parmi ces théories, certaines nous interpellent par les proximités qu'elles ont avec nos propres théories actuelles, bien qu'elles en soient malgré tout très différentes. Ainsi, par observation directe, on imagine très tôt que la vie ne provient pas que de la reproduction entre individus des espèces, mais qu'elle provient aussi, sous certaines conditions, de la matière inerte : c'est la *génération spontanée*.

²³ KANT, *Critique de la faculté de juger*, §75, dernier alinéa.

²⁴ Poincaré H., *La valeur de la science*, 1913, p. 19.

²⁵ *Ibidem*, p. 20

²⁶ *Ibidem*, p. 21.

En Chine antique par exemple, on pense que les pucerons peuvent provenir des bambous, par génération spontanée²⁷. En Egypte antique, les crapauds viendraient de la boue. Dans le cas des pucerons, donc, leur forme de vie viendrait d'une autre forme de vie : les bambous. Mais dans le deuxième cas, on constate que la forme de vie des crapauds proviendrait de l'inerte : de la boue. Ainsi, il y aurait comme provenance possible de la vie, à la fois d'autres êtres vivants mais aussi des éléments inertes. On voit donc bien que l'idée d'une origine de la vie à partir de l'inerte n'est pas neuve. Bien entendu, il ne s'agit pas pour ces peuples antiques de dresser des systèmes ou des théories à propos de la vie ou de son évolution ; mais on constate que la question de l'origine de la vie semble importante, parfois même pour des raisons métaphysiques ou religieuses.

Mais en Grèce dès le VIIe siècle avant J.-C., les philosophes dits « physiciens » tels que Thalès ou Anaximandre s'interrogent sur l'origine de la matière vivante et inerte. Il s'agit pour eux de renforcer leur vision « cosmogonique » du monde : l'émergence de la vie fait ainsi partie d'un système décrivant l'origine de la matière et du monde. La vision du vivant s'inscrit donc dans une optique explicative du monde considéré comme un système cohérent, selon des principes matériels et non plus selon des principes mythologiques ou purement divins. Déjà à cette époque, les *Eléments* (eau, feu, etc...) plutôt que les dieux peuvent expliquer l'origine des créatures et du monde.

Bien plus tard, au *siècle des Lumières*, on postule une origine parcimonieuse du vivant, qui aurait par la suite évolué et se serait modifié par plusieurs modes d'action. Ainsi, Diderot (XVIII^{ème} siècle apr. J.-C.) décrit en ces mots sa vision de l'émergence du vivant : « *La nature n'a fait qu'un très petit nombre d'êtres, qu'elle a variés à l'infini, peut-être qu'un seul par la combinaison, mixtion, dissolution duquel tous les autres ont été formés*²⁸. » On remarque déjà quelques proximités avec notre vision contemporaine, qu'on détaillera plus bas : la vie est issue de la Nature, et elle semble évoluer et se complexifier d'elle-même. En outre, on remarque une volonté de vouloir définir une forme d'origine primordiale, socle sur lequel la diversité se serait appuyée et déployée. Mais l'idée de *génération spontanée* persiste, et on reste ainsi assez éloignés de la vision *évolutionniste* et *néo-darwiniste* du modèle actuel : à la même époque, pour Lamarck, il semble, « *pour ainsi dire, que la matière s'animalise de toutes parts, tant les résultats de cette étonnante fécondité sont rapides*²⁹ ». Il ajoute que « *La terre en effet, particulièrement vers sa surface, les eaux et même l'atmosphère dans certains temps et dans certains climats, sont peuplées en quelque sorte de molécules animées, dont l'organisation quelque simple qu'elle soit, suffit pour leur existence. Ces animalcules se reproduisent et se multiplient, surtout dans les temps et les climats chauds, avec une fécondité effrayante, fécondité qui est bien plus considérable que celle des gros animaux dont l'organisation est plus compliquée.* » Ainsi, on constate par ces théories différentes les unes des autres, que la vision du monde dans laquelle les humains de toutes époques évoluaient a participé à leur

²⁷ RAULIN CERCEAU F., *Les origines de la vie : Histoire des idées*, p. 11.

²⁸ Denis Diderot, *Éléments de physiologie*,. Œuvres, t. I : Philosophie, Paris, Laffont, « Bouquins », 1994, p. 1261-1317 (p. 1261).

²⁹ J.-B. Lamarck, *Système des Animaux sans vertèbres*, ou Tableau général des classes, des ordres et des genres de ces animaux ; présentant leurs caractères essentiels et leur distribution d'après les considérations de leurs rapports naturels et de leur organisation, et suivant l'arrangement établi dans les galeries du Muséum d'Histoire naturelle, parmi leurs dépouilles conservées ; précédé du Discours d'ouverture de l'an VIII de la République, Paris, Déterville, 1801, p. 21-22.

édification de leur vision scientifique. Historiquement, il semble que notre compréhension du monde ait été dépendante de notre culture ainsi que de notre environnement, et il n'y a pas de raisons pour que ce ne soit pas le cas encore de nos jours : il s'agira dans la suite de ce travail, de bien mettre en relief ces disparités, par rapport à notre propre arsenal épistémologique et conceptuel.

Aujourd'hui, on précise l'origine du vivant sur terre il y a environ 4 milliards d'années, cela à partir d'un substrat matériel, et on en explique la foisonnante diversité par l'action de l'évolution. En fait, on essaie de comprendre la biologie à travers deux lorgnettes : la théorie de l'évolution ainsi que la génétique (en y incluant la biochimie et la microbiologie). A. Oparin (1894-1980), avec son idée d'évolution moléculaire, postule l'origine du vivant à partir de la matière inanimée, qui aurait évolué d'une manière continue vers plus en plus de complexité structurelle et fonctionnelle, à travers de très longues séries de changements chimiques, jusqu'à devenir les premières compartimentalisations de « vie ». Il explicite ses vues dans son livre *The Origin of Life*, publié à Moscou en 1924 déjà.

La théorie de l'évolution propose un modèle pour expliquer ces processus de la vie à travers les interactions qu'elle opère avec elle-même et son environnement, tandis que la microbiologie décrit les interactions que ses constituants moléculaires peuvent entretenir à travers ses niveaux d'organisation et ses métabolismes. On observe à nouveau des *niveaux d'organisation* : écologie (macro) et microbiologie (micro), ainsi qu'une *historicité* : la théorie de l'évolution. On part du principe que *la science spéciale* que l'on nomme « biologie » regroupe les théories qui parlent de ces niveaux et de ces processus, liés ensemble. Mais durant cet événement, ce « saut qualitatif » qui a permis à la matière de faire émerger le vivant, quels sont les systèmes et les processus qui se sont mis en place ? Ces processus se décrivent-ils avec des outils propres à la physique, ou par des concepts propres à la biologie ? Faut-il « attendre » que la vie ait émergée pour pouvoir parler de biologie, ou peut-on déjà en parler précisément lorsqu'elle émerge ? Ou est-ce de la physique qu'il faut parler ? En fait, est-ce que le monde « pré-biotique » tient-il du monde de la physique, ou de celui de la biologie, ou des deux ? À partir de quand, concrètement, existe-t-il un objet d'étude pour la biologie ? En fait, il peut être légitime de considérer les systèmes vivants comme étant différents des systèmes physiques, puisqu'ils présentent des particularités nouvelles bien qu'étant, apparemment, constitué des mêmes matériaux. De plus, on observe déjà des comportements et des propriétés différentes au fil des différents niveaux d'organisation de la matière, ainsi :

« Why should organic macromolecules not be very different in principle from small molecules, when liquids are very different from gases, and solid matter is very different from both? If more really is different, then why should these behemoths, proteins, not have special causal powers that small molecules do not possess? »³⁰

Peut-être que les sciences spéciales de la biologie devraient regarder leur objet d'étude d'une manière différente de celle des physiciens ; peut-être qu'une lecture strictement analytique et mécaniste des phénomènes vivants nous ferait perdre de vue les aspects les plus cruciaux de l'étude de la vie, « *After all, why should biologists and philosophers feel that they must be plus mécanistes que les physiciens*^{31 32?} » Il s'agira

³⁰ Barham J., "The Emergence of Biological Value", p. 222

³¹ En français dans le texte.

ainsi de se pencher sur ces fameux « *causal powers* » des systèmes biologiques considérés comme émergents. Une compréhension de ce qu'est la vie par rapport à l'ontologie fondamentale de la matière semble ainsi utile non seulement pour nous aider à comprendre ce qu'est la vie, mais aussi pour comprendre les liens causaux de la matière lorsqu'ils sont justement « vivants », lors de leur « émergence ».

Il s'en suit la grande question : en effet, comment parler de l'émergence de la vie, sans caractériser le vivant ? Comme s'interrogeait Kant, qu'en est-il de la frontière entre vivant et inerte :

« 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 certaine³³. »

Il y a de nombreuses façons de parler du vivant, surtout le vivant que l'on observe aujourd'hui : si je casse une pierre, elle reste brisée, tandis que si je me casse un os, il peut se réparer. Ainsi donc, notre intuition nous suggère des manières de caractériser le vivant. Mais pour la définir, il y a peut-être des critères moins arbitraires que l'intuition. Aujourd'hui, il n'y a pas de consensus absolu pour caractériser le vivant, mais parmi ces caractéristiques de la vie, on peut citer : *la reproduction, l'auto-organisation, la lutte contre l'équilibre thermodynamique par homéostasie, la capacité à évoluer, la capacité à renfermer de l'information, etc...* Ou encore, on peut mentionner la définition donnée par la NASA, un peu plus ramassée : « *La vie est un système chimique autonome capable d'évolution darwinienne.* » Ces visions renvoient finalement à l'ambition d'articuler *la vie* (telle que nous la connaissons), à *la matière* (que nous tentons de comprendre en la manipulant et en la théorisant). De plus, ces critères fonctionnent certainement en systèmes ; n'en posséder qu'un seul ne semble pas vraiment garantir le statut de « vivant » : un virus est-il vivant, puisqu'il se reproduit ? Un cristal est-il vivant, puisqu'il s'autoorganise ? Un frigo est-il vivant, puisqu'il défie l'état d'équilibre thermodynamique de son environnement ? Il semble difficile de se limiter à un critère, et on tient pour probable qu'il soit nécessaire de faire appel à un faisceau de caractéristique lorsque l'on veut parler du vivant en tant que tel, mais qu'est ce qui a fait « émerger » la vie de ce faisceau de caractéristique ? Par ailleurs, en *systems biology* on fait appel à *l'émergence* lorsque les interrelations entre les niveaux d'organisation adoptent des dynamiques *complexes*, qui s'organisent souvent dans des rapports *non-linéaires* et probabilistes, ou encore dans des *dynamiques de rétroactions*. Pour comprendre ce que signifie cette *non-linéarité*, prenons le cas des *effets de seuil* : la mayonnaise prend d'un seul coup après un seuil critique, non pas progressivement... le pot de confiture ne s'ouvre pas après les 6 premières tentatives forcées, mais s'ouvre d'une pichenette à la 7^{ème}... un système est vivant lorsqu'il a $n+x$ qualités, mais pas lorsqu'il en a n ... on parle d'interactions non-linéaire entre des objets lorsqu'ils composent un système où il n'y a pas de proportionnalité des effets envers les causes, ni additivité des causes sur ces effets : les relations ne se décrivent pas avec une droite régulière dans un graphe mathématique, mais avec une courbe. La théorie du chaos est friande de ces non-linéarités, et on en voit des applications dans tous les domaines.

³² Barham J., "The Emergence of Biological Value", p. 222

³³ Emmanuel Kant, *Rêves d'un visionnaire expliqués par des rêves métaphysiques*, 1766

Il serait ainsi approprié de s'intéresser à ces dynamiques complexes et ces systèmes non-linéaires si on veut aborder la question du vivant et de son émergence. Et parmi ces dynamiques, les relations causales semblent floues : les parties influencent le Tout, le Tout influence les parties, et l'environnement joue aussi un rôle particulier... On est facilement tenté de décrire les relations causales qui caractérisent la vie par une forme *d'holisme*. En effet, les rapports causaux sont tels qu'on ne sait plus vraiment où regarder pour en saisir les origines. Comparons les causalités décrivant deux systèmes, l'un simple et linéaire et l'autre complexe et non-linéaire : la trajectoire d'une balle dans un match de ping-pong, et une embryogénèse.

Causalement le mouvement de la balle durant un match de ping-pong semble descriptible en peu de lignes : on peut s'intéresser aux forces, aux mouvements cinétiques appliqués à chaque échange, à la gravitation qui s'exerce dessus etc... de façons à décrire des trajectoires uniformes et mécaniques. La causalité semble simple : rien ne se perd, tout se transforme, on n'a qu'à retracer les échanges et les transformations d'énergies appliquées au système, presque comme on le faisait à l'école. Bien sûr, on pourrait arguer qu'il faudrait mobiliser l'intégralité de l'univers dans les équations pour comprendre le mouvement d'une seule de ses parties, mais les effets des parties éloignées seraient tellement infimes qu'ils sont négligeables dans les calculs : dans ce cas, on peut s'intéresser strictement au niveau local pour obtenir des résultats fiables.

Mais si l'on prend un processus biologique complexe, comme l'embryogénèse³⁴ : de mitose en mitose, les cellules souches se divisent et mettent en place les bases des organes petit à petit. Pour constituer les bases d'un organe, les cellules doivent se déplacer, se regrouper, modifier leur rythme de croissance, mourir, fusionner, se scinder, disparaître, se coordonner... Certaines vont former la colonne vertébrale, d'autres un bras, le cœur ou les cheveux. Pendant cette morphogénèse (détermination des formes) s'impliquent de nombreux échanges hormonaux et métaboliques, qui eux-mêmes enclenchent des sous-systèmes divers et variés. Des apports énergétiques permettent de nombreuses oxydoréductions : on perd vite le fil ...quelle réaction déclenche exactement quel processus ? On remarque donc que les liens de causalités semblent bien plus flous et opaques dans des systèmes non-linéaires et complexes, tel que décrits par la biologie, et on est facilement tenté de parler « d'émergence » de nouveaux systèmes, jusqu'à même parler d'émergence de nouveauté ontologiquement non réductible. Ces niveaux d'organisations et ces relations complexes semblent brouiller les cartes, lorsque l'on essaie d'en lire les grandes lignes causales. En fait, « *l'organisme est concerné par sa signification interne, par la manière dont les choses se produisent ensemble, et par l'intégration des événements qui supportent sa forme dynamique et entretiennent ainsi sa signification dans le monde*³⁵. » Mais qu'en est-il du pouvoir causale dans ce système hiérarchisé ? Est-il possible de réduire les rapports de causalité à un niveau fondamental, ou les propriétés émergées détiennent-elles une forme de statut ontologique particulier ? C'est en tentant de proposer une piste de lecture que nous nous intéresserons grandement à ces hiérarchies et à ces niveaux.

Ainsi, que l'on admette ou non que ces niveaux d'organisation existent, il peut sembler tentant de les résumer à un seul *fondement*, ou à un niveau fondamental, qui

³⁴ Pour cette comparaison, voir PEAT, *synchronicité*, p. 77.

³⁵ *Ibidem*, p.81.

expliquerait toutes les descriptions qui en seraient issues, de façon à exprimer une forme *d'unité*. Mais dès le moment qu'on décide de choisir de pencher pour, ou contre *ce réductionnisme*, on se heurte à des enjeux épistémologiques, qui remettent en cause notre conception même de la connaissance. Ainsi, pour résumer grossièrement, deux tendances s'opposent avec plus ou moins de fermeté : d'un côté, les partisans de la *complexité*, qui se posent comme défenseur de cette *émergence* et qui ont comme mot d'ordre que « le Tout est plus que la somme de ses parties » (holisme), et de l'autre les tenants du *réductionnisme* qui avancent que l'on peut ontologiquement ou épistémologiquement réduire les concepts portants sur les niveaux d'organisation supérieurs, vers un niveau plus fondamental. Bien entendu, les postures qui viennent d'être introduites-là ne sont pas aussi catégoriques en réalités. Il existe en effet des points de vue bien plus compliqués que cela, ces nuances étant plus ou moins marquées vers une tendance ou vers une autre. Dans la suite de notre travail, nous nous pencherons surtout sur les conceptions de la *complexité* et *d'émergence* telles que présentées par KIM ou JODOIN³⁶. Pour ce qui est du réductionnisme, nous nous limiterons aux conceptions propres à ESFELD et SACHSE. En résumé, dans le cadre de l'émergence de la vie, nous tenterons de comprendre comment intégrer ces notions de *complexité* et *d'émergence* dans une vision cohérente avec la conception de la *métaphysique naturaliste*, en tenant compte que cette dernière “*seeks to construct a complete and coherent view of the world including ourselves on the basis of science.*”³⁷

En somme, se poser la question de ce qu'est *la réalité*, qu'elle soit par niveaux ou non, n'est pas chose évidente. Cette question soulève des interrogations au niveau *ontologique*, mais aussi au niveau *épistémologique* des sciences que l'on utilise. Que l'on défende une position réductionniste ou antiréductionniste n'est pas sans conséquences. De ce choix, s'élèvent alors des questions : est-il possible de concevoir la causalité comme étant existante, et si oui, quels sont les niveaux où *ces relations de causalité* s'opèrent ? Est-ce que les *systèmes complexes* de niveau d'organisation supérieur possèdent-ils une ontologie particulière ? Les catégories que l'on utilise pour décrire ces processus s'intègrent-ils dans une conception cohérente du *Temps* ? Est-ce que les expériences que nous utilisons pour interroger le monde rendent compte d'une description fiable de la réalité ? Enfin, ces interrogations nous permettront de développer une autre question : est-ce que les concepts et les catégories utilisés par la biologie sont-ils réellement les fruits d'une émergence constituant un saut qualitatif original, ou est-ce que les interrelations de ces systèmes complexes se voient réductibles à des principes de la physique fondamentale ? En un mot : les descriptions faites à propos des *systèmes émergents* peuvent-elles ou non être *réduites* ? Ce sont là des questions et des interrogations que nous traiterons dans ce travail. L'idée sera donc de poser des bases sur lesquelles nous pourrions raisonner, autour de la question de l'émergence de la vie.

³⁶ Pour des explorations plus en détails de ce que peuvent être les *niveaux d'organisation des systèmes complexes* ainsi que leurs relations de *causalité*, voir les ouvrage *The Systems Views of Life* (dir. CAPRA F. & LUISI P.L.) et *Systems Biology* (dir. BOOGERD F. & cie), et les articles suivants : BICH L. (2012), DELEPORTE P. (2013), JODOIN L. (2013), KISTLER M. (2013), RICARD J. (2003 et WIMSATT.

³⁷ ESFELD M. « La philosophie comme métaphysique des sciences », in *Studia Philosophica* 66, 2007, p.1

3. Causalité et ontologie : déterminisme, Hume, les pouvoirs et la structure dynamique du monde.

Dans notre vie de tous les jours, nous observons des relations de cause à effet, et nous les lions à une conception de « l'avant » et de « l'après ». Mon réveil sonne le matin, je me réveille. Je touche la plaque du four en préparant mon repas : je me brûle un doigt. Mon stylo roule vers le côté de la table sans obstacles : il tombe sur le sol... Ces relations que l'on observe ont l'air évidentes, un effet est précédé d'une cause : il a fallu que je touche la plaque pour que je me brûle ; la douleur et la brûlure ne sont pas apparues sans raisons, comme par magie ! Aristote parlait déjà de cette notion en ces termes : « *Rien n'est dû par hasard, mais il faut toujours que ce soit quelque cause*³⁸. » Leibniz, quant à lui, développe son *principe de raison suffisante* : Selon lui, tout effet a une cause, il n'y a pas de place pour l'irrationnel et il est possible de remonter à une cause première. Pour lui, la « cause première » semble être Dieu :

« *Ainsi il faut que la raison suffisante, qui n'ait plus besoin d'une autre raison, soit hors de cette suite des choses contingentes, et se trouve dans une substance, qui en soit la cause, ou qui soit un être nécessaire, portant la raison de son existence avec soi ; autrement on n'aurait pas encore une raison suffisante, où l'on puisse finir. Et cette dernière raison des choses est appelée Dieu*³⁹. »

Cette façon de comprendre le monde comme un agencement de causes et d'effets est donc ancien, et la question du *déterminisme* qui a longtemps été lié à ce *principe de raison suffisante* l'est tout autant. La causalité se comprendrait donc intuitivement comme une succession de cause et d'effet, ce qui suggère d'emblée l'image d'une chaîne, d'une série de maillons et de séquences dans laquelle chaque élément serait fermement lié entre ses deux voisins, de façon telle que chaque extrémité de la chaîne s'étendrait indéfiniment dans les deux directions, comme vers un *passé* ou un *futur*⁴⁰.

Mais où se situe ce « pouvoir causal » invoqué ? en effet, l'unicité du monde nous suggère une forme d'unicité causale ; pourtant nous constatons que nous disposons de plusieurs sciences spéciales en plus de la science fondamentale de la physique. La causalité existe-t-elle ? est-elle complètement réductible à la physique, ou est-ce que les sciences spéciales jouissent-elles d'un certain pouvoir causal ? En effet, on pourrait se poser la question : quels sont les niveaux d'organisations sur lesquels se justifie un pouvoir causal ? Est-ce l'animal, ou ses organes, ou les molécules de ses organes, ou les atomes de ces molécules, ou les particules de ces atomes, qui possèdent un pouvoir causal ? De plus, se pose la question du déterminisme et de l'indéterminisme : Est-ce que l'intégralité des rapports causaux reposent-ils sur le niveau fondamental des particules, ou y a-t-il des niveaux où les rapports causaux sont initiés par des entités de niveaux supérieurs (par exemple un organisme), de façons à ce que le déterminisme soit pondéré par des formes de contingence ? Y a-t-il des niveaux d'organisation de la matière où émergeraient des rapports causaux, dont l'adéquation causale serait nouvelle et non réductible à la physique, comme l'entendent les tenants

³⁸ Aristote, *Métaphysique*, 6, 1071b.

³⁹ Leibniz, *Principes de la nature et de la grâce*, §8

⁴⁰ Pour cette image de la chaîne, voir PEAT, *Synchronicité*, chap. 2.

de l'émergentisme ? Est-ce que le rôle d'agent attribué à la matière vivante, par ses intentionnalités, permet-il de revendiquer un statut ontologiquement nouveau aux niveaux où ces configurations complexes et vivantes seraient émergentes ? Par ailleurs, est-ce que l'univers en tant que tel est-il complètement déterministe au niveau physique et fondamental, de façons à ce qu'il soit comme constitué en un bloc causal irrémédiable, prédictible dans son passé comme dans son présent ?

En fait, pour comprendre l'interaction causale entre les niveaux d'organisation de la matière dans l'univers, il semble approprié de s'interroger à propos des fondements ontologiques de celui-ci : notre vision du monde, pour scientifique qu'elle soit, doit en effet composer avec ces niveaux. Enfin, se posera la question de cette vision scientifique du monde. En effet, nous sommes, en tant qu'individus et en tant qu'être humain, intégrés dans l'univers : comment pouvons-nous prétendre en construire une image complète et scientifique, si nous faisons partie intégrante de l'expérience ?

Dans cette partie, nous nous interrogerons sur le principe de causalité et de déterminisme qui y semble lié. Puis, nous verrons comment l'émergence du vivant implique une forme d'asymétrie dans les rapports causaux au sein de l'histoire de l'univers : la nécessité semble laisser place à une forme de contingence dès l'apparition d'agents et de vie dans l'univers, il s'agira d'approfondir ces notions. Puis, nous tenterons d'élucider ce rapport entre intentionnalité et physique, de façons à sauvegarder le principe de complétude de la physique. Enfin, il s'agira d'explorer les rapports causaux et les fonctions des sciences spéciales par rapport à l'unicité du monde : comment est-il possible d'avoir à la fois des sciences fondamentales et des sciences spéciales, pour décrire un monde unifié ?

En somme, en tentant de clarifier les rapports causaux et les implications fonctionnelles des sciences fondamentales et spéciales, on favorisera la compréhension des systèmes complexes qui entendent revendiquer un statut ontologique nouveau et émergent. Il est en effet nécessaire d'apporter une base et une armature claire pour aborder les parties 4 et 5 suivantes, qui aborderont spécifiquement les systèmes complexes caractérisant l'apparition de la vie, et qui entendent revendiquer un statut ontologique nouveau par rapport aux sciences fondamentales, contre le réductionnisme.

3.1 Causalité, déterminisme, contingence et liberté d'un point de vue classique

En physique (en tout cas classique), le *principe de causalité* affirme que si un phénomène (une cause) produit un autre phénomène (un effet), alors le premier précède le second : il y a un ordre temporel (mais nous verrons au point 3.4 que la notion de causalité est contestée par Hume notamment). Cela semble intuitif à première vue, et ce principe nous permet de concevoir le monde comme étant compréhensible, puisqu'il fait écho à ce que nous observons tous les jours. C'est certainement pour cette raison que l'humain a construit sa vision scientifique sur, entre autres, cette conception : « *le principe de causalité sera sans doute un des derniers auxquels les sciences renonceront un jour* », nous dit Gilles Cohen-Tannoudji⁴¹. Mais le principe de causalité heurte

⁴¹ Gilles Cohen-Tannoudji, *Le temps des processus élémentaires I*, dans *Le temps et sa flèche*, sous la direction d'Étienne Klein et de Michel Spiro, Editions Flammarion, 1996,

rapidement certains écueils philosophiques : qu'en est-il du *déterminisme*, et y a-t-il une place pour le *hasard* dans l'univers ? En corolaire à cette question : la vie est-elle un phénomène dû au hasard, ou est-elle le fruit de la nécessité ? En effet, de nombreux scientifiques acceptent une évolution *déterministe (nécessaire)* du monde physique, or la vie biologique semble aussi issue de ce monde physique. Par ailleurs, cette vision *nécessaire* du monde n'est pas nouvelle, puisqu'elle était déjà postulée par le type d'atomisme développé au V^{ème} siècle avant J.-C. par Démocrite et Leucippe : pour eux, les corps naturels sont assemblés d'atomes et le mouvement de ces derniers est l'origine causale des choses. Dans cette vision de l'univers, tous les phénomènes sont déterminés et nécessaires. Déjà dans l'antiquité, cette vision déterministe semble acceptable : elle dépend du mouvement des atomes, et on la retrouve à l'époque moderne.

En effet, poussons à l'extrême ce principe de déterminisme : sous réserve que l'on connaisse les états des particules ainsi que les formules qui les régissent, la causalité ainsi conçue par la mécanique classique permettrait d'imaginer, comme le suggère le *démon de Laplace*, un déterminisme total du monde ainsi qu'une compréhension du passé et du futur. Ainsi, Laplace nous dit au XIX^{ème} siècle :

« Une intelligence qui, à un instant donné, connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la composent, si d'ailleurs elle était suffisamment vaste pour soumettre ces données à l'analyse, embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome ; rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir, comme le passé, serait présent à ses yeux⁴². »

Cette expérience de pensée est intéressante pour notre travail, et ce pour deux raisons. Tout d'abord, elle approche la causalité d'une manière extrêmement déterministe, mais aussi réductionniste : tout l'univers serait prévisible et « réductible », quel que soit son niveau d'organisation, à partir d'une connaissance de l'état physique des particules. On pourrait donc réduire les sciences spéciales aux sciences physiques en un sens directement éliminativiste. Ensuite, elle affirme que le passé et le présent sont des éléments qui entretiennent des relations de cause à effet très strictes : si on peut connaître le passé en connaissant l'état du présent, alors on devrait en principe pouvoir comprendre l'émergence de la vie (et même remonter la « chaîne causale » au-delà de cet événement) rien qu'en observant l'état des particules et des systèmes d'aujourd'hui, sous réserve que l'on en connaisse les états physiques... Ainsi, la vie pourrait être apparue de manière spontanée de la matière inerte, et on pourrait selon Laplace en retracer l'historicité parfaite, à condition d'avoir accès à tous les états des particules de l'univers. Mais qu'est-ce que cela signifie ? Quelles seraient les forces et les raisons qui l'auraient poussée à s'organiser ainsi ? Qu'entend-on en se demandant si cette apparition était nécessaire ou fortuite ? Il est en effet intéressant de se poser la question de la nécessité ou de la contingence de cette organisation de la matière vers la vie. La matière doit-elle nécessairement et spontanément s'autoorganiser lorsque les circonstances le permettent, ou la vie ne serait-elle que le fruit d'un hasard et d'une chance complètement fortuite ?

⁴² Pierre-Simon Laplace, *Essai philosophiques sur les probabilités*, Courcier, 1814

Les tenants du déterminisme pensent que l'apparition du vivant était une nécessité sur Terre, compte tenu des conditions initiales présentes : à partir des molécules, la matière s'autoorganiserait spontanément en biomonomères, puis en macromolécules qui se compartimenteraient jusqu'au façonnement d'une forme de matériel génétique et à l'apparition des réseaux métaboliques, propices à l'apparition des cellules. Opposés à cette vision, les partisans de la contingence avancent que la vie aurait pu ne jamais émerger, ou qu'elle aurait certainement pu prendre un tout autre chemin que celui décrit plus haut. Mais que signifie le concept de contingence ? prenons un exemple : je fais une randonnée en montagne, une pierre se décroche d'un surplomb, me tombe sur la tête et m'assomme. L'occurrence simultanée de tous ces facteurs, tous indépendants les uns des autres, a déterminé un événement imprévu mais précis et circonscrit dans un temps et un espace donné⁴³. Les « chances » que cet événement se produise sont dues à des facteurs indépendants (ma vitesse de marche, la hauteur du surplomb, la nature de la roche, etc...) mais qui sont tous causalement déterminés (la chute de la pierre suit une trajectoire et obéit à la gravité, ma vitesse de marche dépend de ma forme physique etc...). Ainsi, ces facteurs, bien que tous déterminés et causalement identifiables, produisent un événement imprévu. Pour le cas de l'origine du vivant, J. Gould synthétise cette idée de contingence en ces termes :

« Since human intelligence arose just a geological second ago, we face the stunning fact that the evolution of self-consciousness required about half of the earth's potential time. Given the errors and uncertainties, the variation of rates and pathways and other runs of the tape, what possible confidence can we have in the eventual origin of our distinctive mental abilities? Run the tape again, and even if the same general pathways emerge, it might take twenty billion years to reach self-consciousness this time – except that the earth would be incinerated billions of years before. Run the tape again, and the first step from prokaryotic to eukaryotic cell might take twelve billion instead of two billion years; and stromatolites, never awarded the time needed to move on, might be the highest mute witnesses to Armageddon⁴⁴. »

Cette vision de la contingence est claire : le cheminement pris par la matière et la vie aurait pu être entièrement différent, et rien ne semble nécessaire en conséquence. Mais cette conception du hasard semble très proche des conceptions spécifiquement Darwinienne de la sélection naturelle : qu'en est-il de la matière inerte et de son auto-organisation ? Quelle part de déterminisme et de nécessité y a-t-il dans les processus décrits par la physique et qui étaient présents lors des conditions cadres de l'apparition du vivant ? Cette approche sera détaillée plus bas ainsi qu'en partie 5.5.

Face aux tenants de la contingence se tiennent les déterministes : pour eux, la vie aurait nécessairement dû émerger. C. de Duve (1917-2013) est partisan de cette conception: *« I favor the view that life was bound to arise under the physical-chemical conditions that surrounded its birth⁴⁵ »*. Cette idée que l'apparition du vivant soit à haute probabilité est aussi partagée par H. Morowitz, qui dit dans son livre *Beginnings of Cellular Life* : *« We have no reason to believe that biogenesis was not a series of chemical events subject to all of the laws governing atoms and their interactions⁴⁶ »*, et qui s'oppose à Monod (un partisan de la contingence de l'apparition du vivant) en ces

⁴³ Pour un autre exemple, voir Capra & Luisi, *The Systems View of Life*, p. 210.

⁴⁴ J. Gould, *The Panda's Thumb*, New York, Norton.

⁴⁵ De Duve C., *Life Evolving: Molecules, Mind, and Meaning*, New York, Oxford University Press, 2002. P. 298.

⁴⁶ Morowitz H., *Beginnings of Cellular Life*, New Haven, CT, Yale University Press, 1992, p. 12

termes: “*We also reject the suggestions of Monod that the origin requires a series of highly improbable events*⁴⁷.” Mais de Duve va encore plus loin dans ce déterminisme inexorable, pour lui l’apparition non seulement de la vie est nécessaire, mais aussi celle de l’humain : « *It is self-evident that the universe was pregnant with life and the biosphere with man. Otherwise, we would not be here. Or else, our presence can be explained only by a miracle*⁴⁸.”

Affirmer que la vie doit nécessairement émerger lorsque les conditions de la matière sont propices est une chose, mais dire que l’être humain aussi doit en émerger en est une autre. Cette position semble beaucoup trop extrême et radicale. En effet, bien que la Nature doive suivre un cours précis en fonction de ses propres configurations de la matière, il y a des éléments imprévus décrits par la théorie de l’évolution (*mutations, sélection par l’environnement, etc...*) qui font que l’apparition de l’homme ne semble pas être nécessaire et inéluctable. En outre, des extinctions de masses provoquées par des causes contingentes (éruptions volcaniques ou météores) ont traversé l’histoire de la vie sur Terre : comment intégrer l’apparition de l’être humain en tenant compte de circonstances aussi lourdes de conséquences ? Il est difficile d’affirmer que l’humain aie dû nécessairement émerger malgré les extinctions de masse (ou même à cause de ces extinctions), car ces événements ont complètement changé la donne génétique à chaque fois qu’elles se sont produites. La sélection naturelle a donc bifurqué dans des trajectoires à chaque fois nouvelles : l’humain aurait-il émergé si l’extinction du Permien-Trias n’avait pas eu lieu ? Ainsi, on peut considérer que la vie puisse émerger en tenant compte des configurations structurelles de la matière qui la permettent, mais il est difficile de dire que l’humain est un aboutissement nécessaire de cette évolution. Par ailleurs, se pose alors la question du *principe anthropique* : l’univers semble avoir, par ses constantes physiques, la capacité de produire la vie depuis son origine, et il serait grandement différent si ses constantes étaient d’un autre ordre (par exemple, si les protons étaient 0.2% plus lourds, nos atomes ne seraient pas assez stables pour exister, tandis que si les forces électro-magnétiques étaient 4% plus faibles, il n’y aurait pas d’hydrogène ni d’étoiles⁴⁹). En fait, il est nécessaire de concéder que la vie puisse émerger pour la simple raison que nous sommes présents et vivants, mais comment penser le déterminisme de cette occurrence ? Et quelles seraient les conséquences d’un tel déterminisme ? c’est ce que nous allons explorer plus bas ainsi qu’en partie 5.5.

Car ce déterminisme, s’il est vérifié, semblerait mettre en péril notre conception intuitive de *la liberté*. Pour Peter van Inwagen, accepter le *déterminisme* a pour implications suivantes :

« *Si le déterminisme est vrai, alors nos actes sont les conséquences des lois de la nature et des événements dans le passé lointain. Mais ni les lois de la nature ni ce qui s’est passé avant notre naissance ne dépendent de nous. Par conséquent, les conséquences de ces choses (y compris nos actes actuels) ne dépendent pas de nous.* »

A première vue, accepter le déterminisme tel que postulé ainsi a pour conséquences de nier notre conception de la liberté, et d’enchaîner la notion de causalité à la nécessité. Il semble donc important de se pencher sur les notions de *causalité* ainsi que de *réductionnisme*, afin de clarifier ce que cette notion de

⁴⁷ Ibidem, p. 13.

⁴⁸ De Duve C., *Life Evolving: Molecules, Mind, and Meaning*, New York, Oxford University Press, 2002. P. 298.

⁴⁹ Capra & Luisi, *The Systems View of Life*, p. 218.

déterminisme implique. En somme, par cette conception du déterminisme de Laplace, l'on pourrait accéder à une connaissance du phénomène de l'émergence du vivant : par connaissance des configurations énergétiques de la matière et par exploration des chaînes causales, l'univers (dans sa configuration et dans sa conception temporelle) n'aurait plus de secrets. Bien entendu, pour que cela soit le cas, il faudrait connaître l'état de toutes les particules en tous points de l'espace de l'univers à un moment T (nous verrons dans le chapitre 5.3 centré sur la notion de temps, que la relativité complexifie la chose puisqu'elle stipule la non-simultanéité). En outre, la conception intuitive que l'on a de la liberté semble être mise en grand péril par cette conception Laplacienne du déterminisme.

3.2 Conflit entre intentionnalité et réductionnisme.

Mais cette conception Laplacienne semble bien ambitieuse. En effet, il semble étourdissant de remonter à rebours tout le processus de l'évolution - soit environ 4 milliards d'années - et en déduire l'origine de la vie ! Et tout cela à partir d'une observation des états de particules d'aujourd'hui. En effet, notre propre expérience en tant qu'individu nous rend méfiant vis-à-vis de ce *déterminisme*, car on pense communément jouir de notre *libre arbitre*. Selon Poppers, le « *sens commun (...) tend à affirmer :*

1. que tout événement est causé par un événement qui le précède, de sorte que l'on pourrait prédire ou expliquer tout événement à condition de connaître tous les événements qui le précèdent avec suffisamment de précision.

D'autre part,

2. le sens commun attribue aux personnes saines et adultes la capacité de choisir librement entre plusieurs voies d'action distinctes, tout au moins dans un bon nombre de situations [...]. Or, 1 et 2 semblent être en contradiction⁵⁰ ».

Intuitivement, on a l'impression qu'il y aurait d'autres « causes » que les simples interactions des éléments et de leurs états physiques : d'autres « choses » auraient pu jouer un rôle dans l'histoire de la vie biologique. En effet, le sens commun nous suggère que nous jouissons d'une forme d'autonomie décisionnelle, car autrement notre caractère « d'agents » dans le monde serait mis en péril : nos actions ne seraient que le résultat de liens de causes à effets remontant à un passé profondément lointain, et nous ne vivrions en fait que dans une totale inertie. Ainsi, « *Si la nature était entièrement déterministe, nous résume Popper, [...] il n'y aurait, en fait, aucune action, mais tout au plus l'apparence d'actions⁵¹.* » Par ailleurs, si on aborde un passant dans

⁵⁰ Karl Popper, « Préface de 1982 », dans *L'Univers irrésolu*, op. cit., p. xv. « *L'exposé de cette contradiction renferme le noyau du problème véritable. Elle oppose déterminisme, au sens de causalité (« tout effet possède une cause »), à contingence (caractère d'un événement qui peut advenir ou non). Comme nous avons tenté de l'expliquer, l'erreur de ce mode de présentation procède 1° : de la confusion entre événements contingents et événements indéterminés (dont le caractère serait de ne pas avoir de cause), et, par voie de conséquence, 2° : de la fausse opposition entre événements nécessaires et événements indéterminés* » (Cunchillos C., « Matérialisme et théorie des unités de niveau d'intégration », p. 10)

⁵¹ Popper K., *L'univers irrésolu*, p. 125

la rue et qu'on lui dit que l'on peut connaître par exemple où se situait son arrière-arrière-grand-père dans l'espace et le temps il y a exactement 100 ans, il serait certainement sceptique. Son intuition et son sens commun lui suggèreraient sûrement de se méfier d'un déterminisme aussi radical. En outre, il pourrait objecter qu'un être macroscopique tel que son grand-père posséderait des qualités supplémentaires par rapport à celles de ses constituants microscopiques. Ces qualités, ou fonctions, échapperaient à la description strictement physique : son ancêtre, par son libre-arbitre, aurait certainement pu se comporter (par intentionnalité) d'une manière tout à fait arbitraire par rapport à l'état de mouvement de ses propres constituants microscopiques. Il aurait des fonctions et des capacités qui auraient « émergées » à son *niveau d'organisation*.

Mais est-ce que cette intuition serait juste, ou penserait-il cela car sa compréhension de la causalité serait faussée ? Il semble en effet difficile de nier le lien de causalité qu'il y aurait entre le niveau microscopique et le niveau macroscopique (organismes). De plus, on ne peut nier cette causalité sans réfuter ce réductionnisme : car si les objets macroscopiques (par exemple les organismes) ont des propriétés autonomes par rapport au mouvement des particules microscopiques qui les constituent, et qu'ils adoptent alors un comportement qui ne se rapporte pas à ses constituants, alors on part du principe qu'il n'y a pas de *complétude de la physique*. Ce qui existe dans le monde pourrait survenir d'autre chose que ce qu'il y a dans le niveau microscopique, ce qui défierait notre conception ontologique du monde, comme nous le verrons plus bas. Ainsi, l'apparition de la vie semble comme étant à l'origine d'un problème dans notre conception et notre vision de l'univers : il y aurait un « avant » qu'on accepterait de reléguer à l'implacabilité de la physique, et un « après » à partir duquel la nécessité des lois et leur déterminisme serait comme remise en question.

Par ailleurs (et en mise à part de l'émergentisme au niveau macro), pour justifier ce rôle d'agent contre le déterminisme pur et dur, le monde microscopique pourrait lui-aussi ne pas être considéré comme étant aussi strictement déterministe et mécaniste. C'est ce que suggérait déjà Epicure (IV^{ème} – III^{ème} siècle avant J.-C.) lorsqu'il ajoutait le concept de *clinamen* (du grec = *déclinaison*) à la vision atomiste de ses prédécesseurs. En fait, il acceptait l'atomisme de Démocrite dans ses grandes lignes, mais l'augmentait d'une caractéristique particulière : la cause des phénomènes proviendrait d'un mouvement spontané et imprévisible se traduisant par un changement aléatoire de trajectoire des atomes. Ces changements (le *clinamen*) *spontanés* et *non-nécessaires* (et donc *contingents*) proviendraient des atomes eux-mêmes. Ces derniers sont donc pour Epicure des agents de la contingence, et sources de la causalité – ils nient donc le déterminisme absolument mécaniste de l'atomisme tel que pensé par Démocrite. En ajoutant un rôle d'*agent* ainsi qu'un soupçon de *contingence* au monde et aux atomes, le *clinamen* suggère, selon Epicure, l'apparition du libre arbitre :

« (...) si tous les mouvements sont enchaînés dans la nature, si toujours d'un premier naît un second suivant un ordre rigoureux, si par leur *clinamen* les atomes ne provoquent pas un mouvement qui rompe les lois de la fatalité, et qui empêche que les causes ne se succèdent à l'infini, d'où viendrait donc cette liberté accordée sur terre aux êtres vivants ; d'où viendrait, dis-je, cette libre faculté arrachée au destin, qui nous fait aller partout où la volonté nous mène⁵² ? »

⁵² Lucrèce, *De Rerum Natura*

En outre, un autre argument en continuité avec celui du *clinamen* est celui issu de la représentation que le *sens commun* se fait au sujet de la physique quantique. En effet, pour beaucoup, la mécanique quantique est le domaine de l'indéterminé où les conceptions intuitives de la raison sont balayées : « *Une autre croyance populaire veut que la physique quantique soit non déterministe parce que ses lois fondamentales sont probabilistes*⁵³. » Mais cette vision ne tient pas. En effet, comme nous le verrons dans la partie 5.1, Boltzmann a montré par sa mécanique statistique, que le hasard objectif et la causalité pouvaient fonctionner ensemble : le hasard peut être résorbé dans les probabilités afin de garantir des liens de causalités effectifs. Ainsi, pour Bunge, « *La physique statistique et la physique quantique invitent toutes les deux à élaborer une conception plus large et plus subtile du déterminisme*⁵⁴. » Ce n'est donc vraisemblablement pas du côté d'un *clinamen* ou de la physique quantique qu'il faudrait chercher pour justifier le libre arbitre ou l'indétermination (cela sera approfondi plus bas). Ainsi donc, pour critiquer le déterminisme, il y aurait deux angles d'approches : d'un côté un argument ontologique au niveau fondamental des particules (par exemple le *clinamen* ou la physique quantique) que nous approfondirons dans la partie 4.1, et de l'autre un argument émergentiste, qui stipule que des fonctions nouvelles (par exemple des formes d'*intentionnalités*) émergent aux niveaux d'organisation les plus élevés (par exemple au niveau des organismes pouvant endosser le rôle d'agent), et qui seraient une conséquence de l'apparition du vivant.

A un niveau macro, l'*intentionnalité* de l'ancêtre du passant mentionné plus haut aurait des causes émergentes qui ne seraient pas strictement liées au monde décrit par la physique, et il ne serait théoriquement pas possible de prévoir sa position dans l'espace-temps, puisque son intentionnalité prendrait « le dessus » sur les états microscopiques. Le statut ontologique de la physique serait tel que le monde ne serait pas descriptible intégralement par celle-ci : « *on s'engagerait en ce cas à maintenir que les théories physiques sont fausses ou inapplicables par rapport à certains phénomènes microphysiques, car des causes, des lois et des explications non-physiques interviendraient dans ce domaine*⁵⁵. » En fait, les êtres vivants pourraient être agents de leurs actions et jouir d'une forme d'autonomie par rapport aux niveaux les plus fondamentaux de la matière, puisqu'ils pourraient infléchir le cours de celle-ci par l'usage de leur libre arbitre. Bien sûr il ne s'agit pas d'*indétermination* des événements : c'est juste qu'ils détermineraient eux-mêmes leurs actes, et porteraient en eux et dans leur libre arbitre les conditions initiales des actions et conséquences futures, comme nous le verrons par la suite.

Par ailleurs, un autre problème survient si on considère qu'il serait *nécessaire* que le monde vivant surgisse (en portant avec lui ces éléments de contingence) au cours de l'évolution, à partir d'un monde physique lui aussi *nécessaire*. En effet, il y aurait une *asymétrie entre le passé et le futur* : le monde inanimé et nécessaire du passé tel que décrit par la physique aurait « donné vie » à un futur capable de porter des événements contingents, à travers les agents vivants, ce qui nierait le développement *nécessaire* et ultérieur du monde physique à venir à partir de ce point *T* de l'émergence du vivant. Cunchillos condense trois pistes pour interpréter ce problème des conduites d'agent :

⁵³ Bunge M., « La physique quantique réfute-t-elle le réalisme, le matérialisme et le déterminisme ? », p. 433.

⁵⁴ *Ibidem*, p. 433.

⁵⁵ Esfeld M., *La Philosophie comme métaphysique des sciences*, p.1

« 1. Tout est déterminé depuis l'origine, et par conséquent il n'existe aucun phénomène contingent – ce qui signifie que ni nos propres conduites, ni celles des autres êtres vivants ne doivent donc être considérées ainsi.

2. L'origine est déterminée, et l'apparition de ces conduites est le fruit de l'intervention d'une force transcendante à la nature.

3. Ces conduites existent et nous avons le devoir théorique d'en expliquer l'origine⁵⁶. »

Ainsi, il faut composer avec l'existence de ces conduites sous peine de mettre en péril notre vision cohérente et complète du monde par la physique. Cette asymétrie de l'univers d'un point de vue de la nécessité et de la contingence doit en principe être explicable par la physique. En fait, il est important de se poser la question de la liberté des êtres vivants en termes qui soient compatibles avec l'ontologie physique, puisque l'on part du principe que la matière et les systèmes vivants reposent sur cette même ontologie et qu'ils ont apparu au cours des changements de l'univers. Comprendre l'apparition du vivant passe par la compréhension de ses implications, il faut donc creuser cette question même si elle est difficile. Popper va tout aussi loin dans son interprétation de ce dilemme :

« Si la nature était entièrement déterminée, le royaume des activités humaines le serait aussi. Il n'y aurait, en fait, aucune action, mais tout au plus l'apparence d'actions [...]. Mais l'argument opposé est également solide. Si l'homme est libre, au moins en partie, la nature l'est aussi ; et le Monde physique est ouvert. Et il y a toutes les raisons de croire l'homme libre, du moins en partie. Le point de vue opposé – celui de Laplace – mène à la prédestination

En somme, on constate un net conflit entre la volonté de concilier le libre arbitre avec le déterminisme, et ce conflit semble reposer sur les notions de *causalités*. En outre, le point d'achoppement de ce conflit est situé au point d'apparition de la vie, où la notion d'agent semble avoir émergé : on ne parle pas de libre arbitre avant l'apparition du vivant. Il y aurait une forme d'asymétrie dans la structure causale de l'univers, où un avant le vivant serait nécessaire, et l'après serait contingent et soumis à des intentionnalités et à des agents. Il semble donc important de se concentrer sur cette notion de causalité, en rapport au vivant. Du côté microscopique, les notions liées au *clinamen* antique et à l'*imprédictibilité* sont avancées ; elles seront traitées plus bas dans la partie 4.1. Au niveau macroscopique, l'intentionnalité tente de rajouter des agents causaux à des niveaux autres que celui fondamental. En interprétant la possibilité de cette émergence, il en résulte une forme d'asymétrie du temps, où il y aurait un « avant » et un « après » l'apparition de la vie. Ce phénomène d'apparition de la vie semble donc charnière d'un point de vue des relations causales, et d'un point de vue des relations entre les niveaux d'organisations : comment comprendre le réductionnisme ou l'émergentisme, cette fois-ci en essayant de nuancer la vision du sens commun ?

⁵⁶ Cunchillos C., « Matérialisme et théorie des unités de niveau d'intégration », p. 11.

3.3 Physique fondamentale, métaphysique naturaliste et complétude de la physique : éléments d'une vision scientifique du monde.

En fait, il y a de bonnes raisons de penser que les propriétés des organismes soient corrélées aux propriétés d'état de leurs constituants microscopiques. En effet, les lois de la mécanique en physique sont universellement applicables, et les variables que ces lois mettent en avant (masse, charge, etc...) décrivent les causes et la forme du mouvement de chaque particule, quel que soit son *niveau d'organisation* : selon Esfeld, « *elles s'appliquent à toutes les particules de l'univers, y compris celles dont les configurations constituent des objets macroscopiques, tels que des organismes*⁵⁷ ». Puisque les objets macro sont nécessairement constitués des objets micros, alors il y a nécessairement un lien de causalité entre eux, lorsque les objets macro instancient un effet (nous creuserons cet élément plus bas). En outre, il y a un autre argument en faveur du réductionnisme ontologique. Le *succès de la physique* (par exemple dans l'élaboration de technologies qui font appel à ses théories) témoigne de l'efficacité d'au moins quelques-uns de ses principes, et il serait donc inapproprié de « jeter le bébé avec l'eau du bain » en amputant la physique de son principe de causalité, principe qui a justement garanti ses succès dans ses applications jusqu'à présent, en occultant ce succès pratique.

En se focalisant donc au niveau des particules comme point de départ, on peut, en gros, se baser sur *l'équation de Schrödinger* pour décrire la dynamique des systèmes au niveau quantique. Par *enchevêtrement*, les relations décrites par cette base fondamentale se propagent donc à tous les niveaux de la nature, de façon à ce qu'elle s'applique universellement. Puisqu'étant au niveau fondamental, les relations d'*enchevêtrement* s'appliquent à tous les objets constitués par elles, et sont donc perpétuelles et universelles. Il est difficile et hasardeux d'avancer que les systèmes de niveau d'organisation « supérieur » soient affranchis de ces relations d'*enchevêtrement*, puisqu'ils les touchent en se reposant sur elles. Ainsi « *toute la diversité de la chimie organique dépend d'un équilibre fragile entre les forces électriques et les forces mécaniques quantiques*⁵⁸. » En résumé, les systèmes macroscopiques ne peuvent pas posséder de valeurs spécialement définies par leurs seules propriétés, qui ignoreraient les valeurs des constituants qui les composent. Pour illustrer cette analogie : on ne pourrait pas concevoir l'expression d'un gène au niveau d'organisation phénotypique, sans accepter une relation causale forte avec la génétique au niveau de la molécule d'ADN. De quelque façon que l'on se pose la question du niveau d'organisation phénotypique, on est obligé à un moment ou à un autre de se référer aux constituants de ces gènes, ces derniers étant à un niveau « plus fondamental »⁵⁹. Si l'on supprime l'objet « ADN », il devient difficile par la suite d'imaginer l'objet « chromosome », ou « épigénétique », ou « phénotype » ... Et au-delà de cette molécule d'ADN, il serait difficile de comprendre la constitution chimique de la molécule en mettant de côté la conception des atomes qui la constituent, et ainsi de suite jusqu'à remonter au niveau fondamental des enchevêtrements quantiques. Par ces considérations, il devient tentant de proposer une forme de réductionnisme qui éliminerait la biologie au profit de la physique⁶⁰. Il serait possible de produire une « théorie-image » qui relierait les

⁵⁷ Esfeld M., « Particules en mouvement : la conception physique de la matière », in *Matériaux philosophiques et scientifiques pour un matérialisme contemporain*, vol.1 pp. 437-453.

⁵⁸ Dyson F., *Les dérangeurs de l'Univers*, p.293.

⁵⁹ Voir Sachse C., "Reduction of Biological Properties by Means of Functional Sub-Types", 2005.

⁶⁰ Voir Sachse faisant référence à John Bickle, « La réalisation multiple des propriétés biologiques » in *Philosophie de la Biologie*, p. 148.

occurrences des propriétés génétiques aux configurations des propriétés physiques⁶¹. Cet aspect nous mène à un dilemme : comment sauvegarder la pertinence des conceptions produites par la biologie ? y a-t-il des éléments épistémologiques propres à *l'émergence* et aux *systèmes complexes* qui permettent de pencher en faveur d'une conservation de la biologie ? Nous reviendrons sur ces considérations dans la partie 4.2 consacrée aux « réalisations multiples » dans les systèmes complexes.

Et pour en revenir au point 3.2 et à l'ancêtre du passant interrogé dans la rue et sous un œil réductionniste, ses « intentions » et ses états mentaux seraient en fait causalement liés à ses propres configurations neuronales, qui instancieraient son comportement. Et ses neurones, quel que soit le pattern qu'ils décrivent pour causer ses états mentaux, sont ultimement constitués de particules microscopiques obéissant à des lois physiques. Les états mentaux seraient donc causés par les configurations neuronales, elles-mêmes constituées de molécules et d'atomes, et il semble hasardeux d'avancer que les états mentaux soient dissociés de ces configurations neuronales : si on supprime les atomes qui constituent les neurones, on supprime aussi les intentionnalités, il y a donc un lien de causalité fort provenant du niveau fondamental microscopique. Il faut donc concéder, par ce rapport causal, que les entités du niveau fondamental jouissent d'une prééminence causale sur les entités d'ordre supérieur qu'elles constituent. En fait, les actions et leurs conséquences causales doivent être comprises comme étant liées par leurs *conditions physiques initiales* respectives. Lorsque je bouge mon bras, les conditions initiales physiques que je confonds avec mon libre-arbitre sont telles que ce mouvement doit nécessairement correspondre à des configurations physiques identifiables, sinon la complétude de la physique se verrait niée. Par intention, on se placerait dans des conditions physiques initiales qui auraient nécessairement une base causale physique elle aussi, et qui ne pourrait qu'induire des effets physiques sur le monde en fonction de ces mêmes conditions. En fait, les configurations neuronales sont telles qu'elles induisent des actions : on les confondrait avec l'intentionnalité, et ce qu'on voudrait appeler « libre arbitre » ne serait en fait que la capacité à opérer des changements dantesques dans les conditions initiales, en déplaçant nos corps physiques dans l'espace. Une configuration neuronale physique, prise comme condition initiale, entrainerait un influx nerveux d'ordre physique vers des muscles d'ordre physique : la conséquence en serait le déplacement dans l'espace d'un corps physique animé par des systèmes physiques. Là n'émergerait rien d'autre qui soit dissociable d'une base physique, sous peine de rompre la complétude de la physique.

Bien sûr, reste ouvert le débat de la *genèse* de ces conditions initiales : en prenant l'exemple des sociétés humaines, on remarque que certaines intentions sont conditionnées par des catégories qui semblent sortir de la physique (par exemple la culture, le droit ou la tradition)⁶². Est-ce que ces catégories non physiques peuvent-elles jouir d'un pouvoir de causalité sur les hommes qui en font appel, de façons à ce que ces catégories « débordent » dans le monde physique en y « forçant » des « conditions initiales physiques » particulières ? Ou est-ce que ces catégories sont « stockées » et codées sous forme de symboles et sous forme de configurations neuronales dans la mémoire ? Peut-être que nos édifices et nos références morales, juridiques et culturels possèdent bien une ontologie propre ayant une influence sur le monde physique par l'intermédiaire de l'intentionnalité. Mais tous ce qui agirait sur le monde physique resterait d'ordre physique. *In fine*, quelle que soit la valeur que l'on donne à ces

⁶¹ *Ibidem*, p.148.

⁶² Voir Sellars, ainsi que Esfeld in *Science et liberté* (2020).

catégories et à leur importance sur le monde physique, on est obligé de concéder que ce qui agit et a des pouvoirs sur le monde physique est forcément traduit à un moment ou à un autre en causes d'ordre physique, de façons à ce que la complétude de la physique soit garantie. L'intentionnalité de l'ancêtre, même si elle peut être le fruit d'actes difficiles à cerner de par l'influence des catégories culturelles, doit nécessairement entrer dans l'ontologie du monde physique puisqu'elle agit en son sein. La question de savoir où et comment se rejoignent potentiellement ces éléments d'ordre non physique et physique est intéressante, mais elle échappe au champ d'étude de ce travail⁶³.

En somme, il s'agit là d'une vision ontologiquement réductionniste, qui rentre dans le cadre d'analyse d'une *vision scientifique du monde*. Il est possible bien sûr d'apporter des arguments allant contre cette vision *éliminativiste*, dans le but de sauvegarder une forme d'indépendance des personnes par rapport à leur ontologie physique, mais approfondir cette question trop profondément nous ferait sortir du cadre de cette étude. Dans la suite de notre travail, nous allons d'abord approfondir cette vision réductrice, afin d'en comprendre les implications causales. Puis nous présenterons des pistes de réflexion pour comprendre comment il serait éventuellement possible de concéder une forme de libre arbitre, de façons à ce que l'asymétrie de la causalité dans le temps soit mieux comprise. Par ailleurs, on remarque que le rôle d'agent et l'intentionnalité que l'on pourrait concéder aux êtres vivants doit nécessairement s'inscrire dans ce cadre physique et matérialiste. Sinon, le principe de complétude de la physique ne saurait être garanti. En fait, on remarque que l'intentionnalité et le libre arbitre peuvent avoir de l'influence sur la fixation des conditions initiales des équations à partir desquelles on veut décrire le monde physique, mais cette intentionnalité est elle-même d'ordre physique, car la complétude de la physique implique des causes physiques pour les effets physiques. Ainsi, le rôle d'agent concédé aux êtres vivants rentre nécessairement dans les clous du monde physique ; il ne reste plus qu'à en approfondir la nécessité ou la contingence éventuelle ; c'est ce que nous ferons plus bas.

3.4 Arguments critiques sur la notion de causalité : causalité Humienne et causalité de pouvoirs

Par ailleurs, ce triomphe de la *causalité* en tant que concept n'est pas aussi évident ni absolu qu'on pourrait le croire, c'est pourquoi il s'agira de l'approfondir maintenant. En effet, la notion de causalité peut faire l'objet de critiques qui pourraient mettre en péril la pertinence même des sciences spéciales, qui appuient leur édifice conceptuel et épistémologique dessus. Au-delà des débats sur le déterminisme ou sur le libre arbitre des systèmes vivants et des personnes présentés plus haut, il faut avant tout comprendre ce que la causalité signifie d'un point de vue plus approfondi.

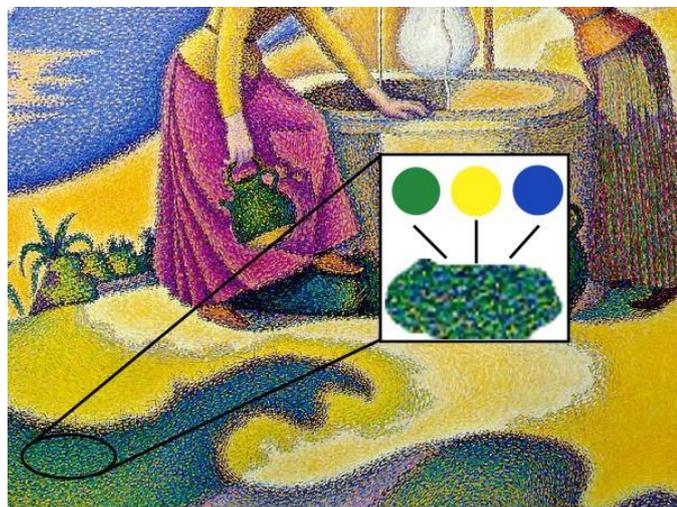
Du côté de la philosophie dès le XVIII^{ème} siècle, puis du côté de la physique dès le XX^{ème} siècle, on soupèse, on critique et on évalue la notion de causalité. Chez les philosophes d'abord : pour David Hume, la chaîne de la causalité ne serait que le fruit d'un mélange d'habitudes et de croyance : « *Nous ne possédons pas d'autre notion de cause et d'effet, si ce n'est celle de certains objets, qui ont toujours été associés les uns*

⁶³ Pour un approfondissement, voir Esfeld M., *Sciences et liberté*.

avec les autres... Nous ne pouvons pas saisir la raison de cette association⁶⁴ ». Puis chez les scientifiques : Russel affirme, dans son article « on the notion of cause » daté de 1912, que la causalité est dépassée. D'après lui, les interactions causales que l'on observe dans la vie de tous les jours (tels que présentés au début de cette partie) ne sont pas validées grâce à des faits physiques qui induisent des relations de cause à effet, mais parce que le monde manifeste des traits physiques que nous interprétons comme causaux au niveau macro. Esfeld résume : « Russell maintient que si nous tenions compte des faits physiques grâce auxquels de tels énoncés sont vrais, nous ne découvririons pas de connexions réelles de cause à effet dans le monde⁶⁵ ».

Mais David Lewis va encore plus loin, dans sa conception de la *métaphysique humienne*. Pour lui, tout ce qui existe sont les relations métriques entre les points de l'espace-temps et les propriétés physiques fondamentales qui se situent à ces points : « Tout le reste de ce qui existe dans le monde est fixé par la distribution des propriétés physiques fondamentales en des points de l'espace-temps, dans le sens où il s'agit d'un trait de cette distribution⁶⁶. » Le monde peut alors être considéré comme une grande mosaïque de propriétés qualitatives instanciées par des atomes tenus les uns aux côtés des autres, à l'image d'une œuvre pointilliste, qu'il présente en ces mots :

« C'est la doctrine que tout ce qui fait le monde est une vaste mosaïque de choses locales – juste une petite chose, et puis une autre (...). Nous avons une géométrie : un système de relations externes de distance spatiotemporelle entre des points. (...) Et à ces points nous avons des qualités locales : des propriétés intrinsèques parfaitement naturelles qui ne réclament rien de plus grand qu'un point et auquel elles sont instanciées. En bref : nous avons un arrangement de qualités. Tout le reste survient là-dessus⁶⁷ »



Tableau⁶⁸ : Comme une toile pointilliste, on ne comprend l'univers donné qu'en tenant compte des qualités pures dont jouissent chacun des « points » disposés en lui.

⁶⁴ David Hume, *Treatise of Human Nature*

⁶⁵ Esfeld, « Les fondements de la causalité », in *Matière première*, édition Syllepse, p. 1.

⁶⁶ *Ibidem*, p. 2

⁶⁷ D. Lewis, *Philosophical Papers volume II*, Oxford University Press, 1986 (p. ix-x)

⁶⁸ Illustration : Paul Signac, *Femmes au puits*, 1892, ajouts et modification : Piscis13 (wikipédia).

Ainsi, la métaphysique humienne renforcée par Lewis n'a pas besoin de causalité pour unifier le monde : ce sont les relations qui existent entre les points métriques qui unifient le monde. Sa vision de la causalité s'inscrit dans les concepts des « mondes-possibles » développés par Kripke, et nuance le déterminisme : « *les lois de nature en vigueur sont telles, qu'il n'existe pas deux mondes possibles quelconques qui soient exactement semblables jusqu'à un certain temps, qui diffèrent après cela, et dans lesquels ces lois ne sont jamais violées*⁶⁹ », il n'entend pas par-là la notion de « causalité universelle⁷⁰ ». Une loi physique n'est nécessaire si et seulement si elle est vraie dans tous les mondes possibles. Selon Lewis donc, une loi n'explique rien, et il ne peut y avoir d'explication de l'évolution temporelle de la distribution des propriétés dans l'univers, et donc aucun moyen de rattacher la question de l'émergence de la vie à une conception causale et épistémologiquement accessible et critiquable. En fait, il n'y aurait donc pas nécessairement de fait primitif sur lequel s'articulerait une compréhension de l'historicité du monde réel. Il pourrait très bien y avoir un autre « Big-Bang » à partir duquel le monde opérerait une autre « historicité » et où la vie n'émergerait jamais. Cette conception contingente du monde impliquerait qu'une évolution temporelle de la distribution des propriétés physiques fondamentales pourrait être entièrement différente. Il deviendrait difficile d'établir des lois physiques ou des modèles dans un monde aussi contingent, ce qui rendrait notre présente étude sur l'origine du vivant comme perdue d'avance, puisque nous nous basons sur les concepts d'historicité, et partons du principe qu'il y a eu des processus ordonnés par des liaisons causale dans l'élaboration du vivant (cette acception sera détaillée plus bas).

Mais en fait, d'un point de vue épistémologique, le déterminisme au sens strict n'est pas *la* condition indispensable pour comprendre l'émergence du vivant. C'est le *principe de causalité* que nous gagnons réellement à défendre (même si le monde n'est pas déterministe) : « *il y a quand même des probabilités objectives fondées sur les pouvoirs causaux et ainsi des explications probabilistes du développement de la distribution des propriétés physiques fondamentales dans l'espace-temps*⁷¹. » Ainsi, même s'il n'y a pas de causalité universelle absolument déterministe, il reste possible de justifier l'émergence de la vie dans un processus cohérent, en faisant appel aux probabilités et donc aux statistiques (ce point serait approfondi dans les parties 4.1 et 5.1). En effet, même si on considère la dynamique des systèmes non-linéaires comme étant non-déterministe à cause de leur complexité, nous pouvons malgré tout travailler dessus et développer des modèles probabilistes qui décrivent leurs comportements particuliers. En fait, si la molécule d'ADN n'a aucune relation de causalité avec les protéines et les enzymes qui l'entourent, alors c'est toute la biologie moléculaire qui n'a plus de sens, ainsi que notre conception Néo-Darwinienne de l'évolution. Tandis que si la molécule d'ADN entretient des liens de causalité avec ces protéines et ces enzymes, même s'ils sont statistiques, alors on peut quand même comprendre la biologie comme formant une science liée par des liens causaux entre eux. On peut donc se passer des modèles absolument déterministes et les troquer contre des conceptions probabilistes, mais il faut sauvegarder les notions de causalité, sans lesquelles les modèles des sciences spéciales deviennent incompréhensibles et inutiles.

⁶⁹ Lewis, « Causalité » (trad. Medomai), in *The Journal of Philosophy*, vol. 70, issue 17, 1973, pp. 556-567.

⁷⁰ *Ibidem*.

⁷¹ Esfeld M., « Les fondements de la causalité », p. 6-7.

Et il existe justement une autre manière de conceptualiser la causalité qui puisse sauvegarder les sciences spéciales, celle de la *métaphysique de pouvoirs*⁷². D'après cette dernière, « *chaque occurrence d'une propriété produit d'autres occurrences de propriétés*⁷³ », contrairement à la métaphysique humienne qui considère que ces occurrences ne sont qu'une simple succession dans l'espace-temps. Dans les deux approches, les propriétés fondamentales sont liées à la physique, mais du côté de la métaphysique humienne la causalité n'est pas nécessaire, tandis que dans la métaphysique des pouvoirs, il y a causalité.

Or, pour comprendre les sciences spéciales telles qu'elles se manifestent à nous, il faut qu'elles aient des connexions nécessaires (comme montré plus haut), et pour que leurs propriétés (des sciences spéciales) aient ces connexions, il faut que les propriétés à la base, au niveau fondamental, aient aussi ces connexions nécessaires : « *L'engagement ontologique des sciences spéciales envers des propriétés fonctionnelles est un engagement ontologique envers des propriétés qui sont des pouvoirs, étant définis par leurs effets*⁷⁴. » Sans cela, le monde décrit par les sciences spéciales est incompréhensible ou redondant, comme dit plus haut. D'un point de vue des sciences spéciales, il faut écarter la conception de la *métaphysique humienne* sur la causalité, et se rallier à celle des *pouvoirs*. Ainsi, les structures physiques fondamentales (la charge, la masse etc...) sont donc des structures causales et non catégoriques, et elles impliquent un réalisme structural. En effet, nous ne pourrions pas les connaître si elles n'étaient pas causales elles-mêmes : pour que l'on puisse découvrir les structures physiques fondamentales à partir des phénomènes observables, il faut que les différences dans les structures fondamentales aient des différences causales menant à des différences dans les phénomènes observables. Sans cela, impossible de développer des modèles cohérents. En effet, « *si les structures fondamentales étaient catégoriques, différentes structures pourraient être corrélées avec les mêmes phénomènes observables. En d'autres termes, sur la base des phénomènes observables, on ne pourrait, par principe, pas savoir quelles sont les structures physiques fondamentales. Il y aurait en ce cas deux mondes possibles distincts quant à leurs structures physiques fondamentales mais indiscernables en ce qui concerne le domaine entier des phénomènes observables dans les deux mondes*⁷⁵. »

Ainsi, il faut privilégier une vision propre à la métaphysique des pouvoirs pour sauvegarder le principe de causalité. Ce choix peut paraître arbitraire, mais c'est le seul qui puisse nous permettre d'aller plus loin dans nos investigations. De cette manière, la causalité qui entoure le phénomène de l'émergence de la vie se voit comme un enchaînement causal provenant des états microscopiques décrits par la physique, et cette émergence est inscrite dans une historicité qui se comprend comme provenant d'un fait primitif : le Big-bang. Même s'il n'y a pas *d'argument physique* pour trancher en faveur de la conception des pouvoirs, nous positionnerons le reste de ce travail selon cette dernière. Car sans cette conception de la causalité, alors on ne comprend plus l'intérêt des sciences spéciales qui s'intéressent à l'émergence du vivant : il s'agit de sauvegarder la cohérence de nos investigations scientifiques. Sauvegarder la causalité, c'est sauvegarder notre édifice épistémologique.

⁷² *Ibidem*.

⁷³ Esfeld, *la philosophie comme métaphysique de la nature*.

⁷⁴ Esfeld, « Les fondements de la causalité »

⁷⁵ Esfeld, « les fondements de la causalité », p. 11

Mais une question reste : quelle est la relation entretenue entre une physique fondamentale s'appliquant à l'univers entier, et les théories des sciences spéciales (par exemple la biologie, la psychologie etc...) qui n'ont que des domaines d'application restreints ? « *Why are there theories of the special sciences in addition to the universal theories of physics?*⁷⁶ » Est-ce que ces sciences spéciales sont-elles vraiment utiles, et permettent-elles de réellement contribuer à dévoiler la métaphysique Naturaliste du monde en rendant saillantes des configurations de la matière que la physique serait incapable de comprendre, ou est-ce que les sciences spéciales n'ont-elles qu'une valeur heuristique, leur seule fin étant de soutenir l'édifice conceptuel de la physique tel un échafaudage, en attendant de faciliter leur propre élimination prochaine dans la physique ?

En somme : *la description physique se penche sur la composition physique des structures, quel que soit le niveau d'organisation que l'on observe, tandis que la description des sciences spéciales traite des effets pertinents produits dans l'environnement de ce niveau d'organisation. La distinction entre les deux façons de décrire est donc avant tout épistémologique : « dans le sens où elle n'est qu'une division du travail scientifique, division qui est utile pour l'organisation de la recherche mais qui n'empêche pas l'identité ontologique*⁷⁷. » En résumé, les relations entre les objets (quels que soient leurs niveaux d'organisation) ont des connexions nécessaires résultant des propriétés qui sont des pouvoirs, cela que l'on ait une conception émergentiste ou réductionniste conservationniste du monde, tandis que ces relations de causalité se fondent au niveau de la physique ; la distinction entre sciences fondamentales et sciences spéciales se trouve au niveau épistémologique. Mais cette distinction semble conserver le problème de l'unicité du monde et de la science : il semble que la primauté de la physique, qui triomphe depuis des siècles, doive encore être approfondie.

3.5 Le fonctionnalisme et les sciences spéciales dans leur rapport à une ontologie primitive et une structure dynamique de l'univers.

Ainsi, quelle serait la plus-value apportée par la biologie pour comprendre le cas de l'apparition du vivant ? En effet, si la physique recoupe et décrit l'intégralité des structures matérielles de l'univers, alors la vie comme objet d'étude devient un objet de la physique. Pour détailler ce problème de la primauté de la physique sur les sciences spéciales, replaçons le dilemme autour de l'émergentisme et du réductionnisme. D'un côté, les théories physiques sont à portées universelles et elles excluent qu'il y ait, « *in addition to the properties that fall within their scope, emergent chemical, biological or physical properties that produce effects of their own in the physical domain*⁷⁸, » cela afin de conserver le principe de complétude de la physique abordé plus haut. De l'autre, défendre un physicalisme éliminativiste et réductionniste aurait pour conséquence de faire peser un poids gigantesque sur les sciences fondamentales.

C'est en partie pour adresser ce dilemme que le fonctionnalisme s'est développé dans les années 1970 : il s'agissait de défendre le physicalisme en disant que les

⁷⁶ Esfeld M. & Sachse C., in *Conservative Reductionism*, p. 2.

⁷⁷ Esfeld M., « Les fondements de la causalité »

⁷⁸ Esfeld M. & Sachse C., in *Conservative Reductionism*, p. 2.

propriétés réalisées étaient toutes d'ordre physique, et d'ajouter que les propriétés décrites par les sciences spéciales adressaient aussi celles réalisées de manière multiple. On sauvegarderait ainsi une approche physicaliste, mais se manifesterait un autre problème lié aux réalisations multiples, celui de l'épiphénoménalisme :

“(…) *If the properties that fall within the domain of the special sciences are physically realized without being identical with physical properties, then it seems, that these properties, insofar as they are not identical with physical properties, cannot cause anything so that they are epiphenomenal*⁷⁹.”

Ainsi, comment serait-il possible que les sciences spéciales participent à l'explicitation du monde, si l'intégralité des causes est comprise par les sciences fondamentales physique ? En fait, le fonctionnalisme présenté ainsi essaie de sauvegarder les sciences spéciales, mais risque de tomber soit dans l'éliminativisme pur, soit dans l'épiphénoménalisme (ou dans l'émergentisme si on se met à nier la complétude de la physique). Plus précisément, Le *fonctionnalisme par rôle* (Putnam) prétend opérer une distinction entre les propriétés fonctionnelles qui constituent l'objet d'étude des sciences spéciales et les fondements physiques. Mais puisque ces propriétés ne sont pas identiques, alors celles des sciences spéciales sont des épiphénomènes. Le *fonctionnalisme par réalisateurs* (Lewis), quant à lui, n'admet que les propriétés fondamentales de la physique et nie celles des sciences spéciales, menant ainsi à un éliminativisme.

Pour pallier ce problème, il faut faire appel à la *métaphysique des pouvoirs* introduite dans la partie précédente (3.4) : si toutes les propriétés du monde sont causales (les propriétés physiques incluses), alors ces propriétés sont aussi indépendantes du fonctionnalisme et évitent le problème de la réalisation multiple. On échappe ainsi non seulement à l'épiphénoménalisme mais aussi à l'éliminativisme : le vocabulaire de la physique se concentre sur la *composition* des structures tandis que les sciences spéciales se concentrent sur leur *fonction*.

D'un point de vue épistémologique, il s'agit de relier les descriptions physiques des structures complexes à leurs descriptions faites dans les sciences spéciales. Avec comme renforts la métaphysique des pouvoirs (considérée comme ayant des pouvoirs causaux), ce type de réductionnisme n'élimine pas les sciences spéciales mais les conserve plutôt puisqu'elles possèdent un pouvoir explicatif, conforme à la « *division du travail épistémologique* » décrite plus haut. Ainsi, selon Esfeld & Sachse :

« *By means of conceiving functional sub-types, it turns out to be possible to make the functional descriptions of the special sciences in their own vocabulary so precise that they are coextensive with the physical descriptions of the composition of the configurations in question. It is thus in principle possible to derive the functional descriptions of the special sciences from physical descriptions*⁸⁰. »

Cette approche repose ainsi sur les prémices décrites plus haut :

- 1) Les propriétés physiques sont des structures et non des propriétés intrinsèques (voir partie 3.4)

⁷⁹ *Ibidem*, p. 3.

⁸⁰ *Ibidem*, p. 3.

2) Les propriétés sont considérées comme des pouvoirs, ayant des pouvoirs causaux sur le monde selon leurs dispositions.

Ainsi, avec cette armature conceptuelle il devient possible d'aborder les considérations propres à la biologie des systèmes qui essaie de revendiquer un statut ontologique nouveaux aux systèmes biologiques complexes dits « émergents ». En fait, il s'agit de concéder une base ontologique indiscutable à la physique, une forme *d'ontologie primitive*⁸¹ sur laquelle s'articulent les systèmes que l'on considère comme complexes (cette *ontologie primitive* ne correspondrait pas aux fonctions de charge, masse etc... des atomes du tableau périodique ; ces choses-là feraient parti de la structure dynamique fonctionnellement compréhensible). Sur cette base, s'appuieraient donc les systèmes complexes dont les descriptions épistémologiques seraient valides, sans pour autant prétendre à une émergence d'ontologie nouvelle. Cela risquerait en effet de nier la complétude de la physique. Ainsi, l'émergence et ses principes se voit « dissoute » dans la description fonctionnelle et épistémologique des sciences spéciales, sans jamais pouvoir revendiquer de formes nouvelles et indépendantes d'ontologie, par rapport à la physique fondamentale. Les dynamiques causalement complexes, non-linéaires et imprédictibles des systèmes complexes doivent nécessairement reposer sur cette forme d'ontologie primitive.

A partir d'une ontologie primitive articulée sur un matérialisme strict comme décrit plus haut, on accepte que les propriétés physiques soient des structures ayant des pouvoirs causaux que les sciences spéciales sont capables d'explicitier et de traiter. On en déduit une structure physique causale qui parvient à offrir une base solide aux structures des sciences spéciales, aux niveaux supérieurs. Cette structure dynamique et complexe constitue « l'échafaudage causal » sur lequel il est possible de justifier un statut épistémologique propre aux sciences spéciales. D'un point de vue modal et de causalité, il faut donc accepter que la structure dynamique décrite ait des pouvoirs causaux. A partir de l'ontologie primitive, on déduit cette structure dynamique ainsi que ses rôles fonctionnels à travers le mouvement de cette même ontologie primitive. Mais cette structure dynamique ne fait pas partie de l'ontologie primitive : ce ne sont que des propriétés fonctionnelles, qui ont certes des rapports causaux, mais qui sont déduites et reposent entièrement sur l'ontologie primitive décrite plus haut. Ainsi, on n'enrichit pas l'ontologie primitive avec des notions de « pouvoirs ». Mais pour conserver le principe de causalité des sciences spéciales, on accepte que la structure dynamique jouisse de pouvoirs causaux. En fait, si l'on veut formuler des lois pour les changements qui se produisent dans l'univers, il est nécessaire de considérer ces pouvoirs, dont les « *paramètres dynamiques définis en termes de leur rôle causal* » permettent de formuler des théories « *pour l'évolution de la configuration de la matière*⁸² ».

⁸¹ Pour l'ontologie primitive, voir Esfeld M., in *Science et liberté*.

⁸² Esfeld M., « Sciences et libertés », p. 75

3.6 Rétrospective du chapitre

En somme, nous avons constaté que la causalité est une notion peu évidente à identifier d'un premier abord. D'un point de vue Laplacien, on s'enfoncerait complètement dans le déterminisme causal. Pourtant, lorsque l'on observe les systèmes vivants, on veut leur attribuer des capacités d'agents et des intentionnalités. Mais ces notions de causalité doivent nécessairement tenir compte de la complétude de la physique. Chez l'homme, se pose aussi la question de la liberté et de l'intentionnalité. Par ailleurs, si les systèmes vivants jouissent de leur rôle d'agent, alors on observe une asymétrie causale dans l'univers : les systèmes physiques inertes et déterminés seraient différents des systèmes vivants à partir de l'émergence de ces derniers. Enfin, on a vu que la causalité pouvait être remise en question, par Hume notamment, et qu'il fallait donc opérer une revisite de l'ontologie et du fonctionnalisme pour éviter l'éliminativisme ainsi que l'épiphénoménisme. Nous avons argumenté pour justifier une conception de la causalité entendue comme des pouvoirs : cette métaphysique donne une primauté à une ontologie physique. Il fallait enfin voir quel était le rapport entre cette primauté et les sciences spéciales, et refaisant une brève analyse du fonctionnalisme. De cette façon, les sciences spéciales reposent sur la base ontologique de la physique sous une forme de « division du travail épistémologique ». Les systèmes émergents peuvent être « dissous » dans cette conception de fonctionnalisme par sous-types, dans la mesure où leur prétention à une ontologie nouvelle est niée, mais où les rapports causaux complexes et nouveaux sont fonctionnalisés dans les niveaux d'organisation.

Les catégories que l'on utilise pour décrire ces processus s'intègrent-ils dans une conception cohérente du *Temps* ? À priori oui, et nous approfondirons ce sujet dans la suite de notre travail, maintenant que nous avons une base fiable qui atteste d'une historicité compréhensible de l'univers, comme étant liée par des causes (plutôt que « contingente » et dépourvue de causalité). Que cette relation causale soit absolument déterministe comme imaginée par le démon de Laplace, ou qu'elle soit le résultat de calculs probabilistes sauvegarde quand même le principe de causalité. Ainsi, le Big-Bang constitue un *fait primitif* à partir duquel une relation causale existe jusqu'à l'émergence du vivant. Nous insistons sur ce choix : la compréhension du cas de l'émergence du vivant est facilitée si l'on intègre ces deux énoncés : (1) la valeur explicative des sciences fondamentales est pertinente pour comprendre le monde réel par les valeurs des propriétés de ses constituants microscopiques, et (2) il y a des relations causales entre les causes provenant de ces valeurs et leurs effets. En conséquence, une compréhension des processus que nous observons dans les sciences spéciales prend du sens, et la valeur épistémologique apportée par les concepts des sciences spéciales, de par l'existence de relations causales, est sauvegardé. Ainsi, comme dit plus haut, si le monde est déterministe, la distribution des propriétés physiques fondamentales à l'état initial de l'univers est un fait primitif, et l'émergence du vivant est lié causalement à ce fait, ce qui permet une compréhension du monde réel dans son historicité, d'un point de vue de la *métaphysique naturaliste*. Ainsi, l'émergence de la vie est un événement inscrit dans le Temps et causalement lié à la physique, il s'agit maintenant de savoir s'il faut faire appel aux conceptions épistémologiques de la physique ou à celles des sciences spéciales, pour essayer d'en comprendre les mécanismes d'émergence. Par ailleurs, même si il n'y a pas de déterminisme établi, il reste possible de se pencher sur cette question, en faisant appel

aux probabilités et à la mécanique statistique. Néanmoins, rien ne certifie par ce biais l'existence ou la non-existence d'un déterminisme.

En rétrospectives, vérifions si nous avons pu apporter une réponse à certaines questions que nous avons soulevées dans l'introduction. *Est-il possible de concevoir la causalité comme étant existante, et si oui, quels sont les niveaux où ces relations de causalité s'opèrent ?* On constate qu'il est possible d'établir une notion de causalité à partir de la conception propre à la *métaphysique des pouvoirs*, que cette causalité s'opère à partir du niveau fondamental des particules et qu'elle traverse les niveaux supérieurs plus complexes, puisque ces niveaux se touchent. *Est-ce que les systèmes complexes de niveau d'organisation supérieur possèdent-ils une ontologie particulière ?* Cette question sera mieux approfondie dans le chapitre suivant consacré aux systèmes complexes, mais pour le moment on avance que le niveau ontologique de la physique est fondamental, et qu'il est de ce fait possible de réduire les sciences d'un point de vue ontologique. *Est-ce que les expériences que nous utilisons pour interroger le monde rendent compte d'une description fiable de la réalité ?* Puisque nous établissons le principe de causalité comme existant, et que nous avançons la *complétude de la physique*, il est possible de générer des vérités qui font écho aux résultats empiriques. Bien entendu, le concept de vérité est plus subtil et délicat que cela, mais nous avançons dans ce travail qu'une optique de la *métaphysique naturaliste*⁸³ peut rendre compte de la réalité du monde. Ainsi, il est possible de comprendre d'un point de vue rationnel et scientifique le phénomène de l'émergence de la vie. Par ailleurs, le fait que nous produisions des énoncés de notre point de vue d'humain implique qu'une vision scientifique du monde stricte et objective soit difficile à mettre en œuvre, mais cette question ne sera pas approfondie.

Il nous reste donc la question à approfondir : *les descriptions faites à propos des systèmes émergents peuvent-elles être réduites ou non ?* Pour le moment, on avance qu'il est épistémologiquement possible de sauvegarder les sciences spéciales⁸⁴. Mais nous verrons dans la suite du travail comment les critiques relevées par la *systems biology* contre ce réductionnisme peuvent être abordées. En effet, les réserves de la *systems biology* semblent légitimes. Il existe des dynamiques et des systèmes qui ne semblent pas faire de sens lorsqu'on les aborde d'un point de vue fondamental : les propriétés de la Nature dans son intégralité, bien qu'étant ultimement et causalement liées au niveau fondamental des intrications quantiques, ne peuvent donc pas se limiter à une vision quantique si l'on désire produire une vision de la *réalité* qui soit compréhensible et utilisable. Par exemple, il est plus aisé et plus pertinent de décrire la *loi de Volterra* (qui traite de l'évolution des ratios proies/prédateurs dans un temps et dans un écosystème donné) en ayant recours à des théories d'ordre biologique (*survie du plus apte, fitness, stratégie de reproduction, êtres hétérotrophes...*), plutôt qu'en faisant appel aux équations de Schrödinger. Bien sûr, comme l'affirme la thèse de Duhem-Quine, (toutes les connaissances et les énoncés qu'on porte sur le monde sont liés) on *pourrait* relier les énoncés de la loi de Volterra à la physique fondamentale puisqu'il existe des relations causales entre ces deux conceptions, mais ce ne serait malgré tout pas vraiment le meilleur choix à faire. En effet, cette loi de Volterra serait quand même plus compréhensible en faisant appel aux concepts des sciences spéciales de la biologie, même si cette dernière n'est pas fondamentale. En outre, la notion de probabilité et de valeur statistique, dans le cas de la loi de Volterra, nous ouvre des

⁸³ Voir Esfeld M. ; Carrier et Mahner.

⁸⁴ Voir Esfeld M. & Sachse C., « Réductionnisme conservatif ».

conceptions moins liées au déterminisme. Nous verrons dans le chapitre suivant, sur les systèmes complexes, que la probabilité joue un rôle crucial dans les sciences spéciales, et que ce rôle est aussi causal. Il s'agira d'approfondir les conceptions qu'on a de la causalité et du déterminisme, dans le cas des *systèmes complexes*.

4. Les systèmes complexes, leurs éléments structurels par niveaux et l'émergence Synchronique

Le concept d'émergence, crucial dans la compréhension du monde propre à la *biologie des systèmes complexes* que nous étudierons maintenant, apparaît sous la plume de G.H. Lewes, bien qu'on en place la parenté dans les écrits de J.S. Mill avec ses concepts de *lois hétéropathiques* et *homopathiques*. Les lois homopathiques dépendent de leur combinaison de causes, tandis que les hétéropathiques s'en distinguent : des propriétés nouvelles en émergeraient.

Ainsi, depuis le XIX^{ème} siècle, le concept d'émergence émaille le paysage scientifique moderne en tentant d'apporter une vision du monde proche de l'holisme, qui pourrait être condensée par l'adage suivant : « le tout est plus que la somme de ses parties. » Cette posture s'oppose au réductionnisme, comme aux doctrines dualistes : il s'agit d'une vision physicaliste qui affirme l'existence de niveaux d'organisations complexes et stratifiés, où des entités des niveaux complexes ne seraient pas forcément réductibles à leurs composants de niveaux inférieurs.

Pour J.S. Mill (1806-1873), les propriétés de l'eau ne seraient pas réductibles à celles de l'hydrogène ou de l'oxygène. Il y aurait donc des structures plus complexes de la matière qui feraient émerger des propriétés indécélables dans leurs constituants. Par ailleurs, ce principe d'émergence peut aussi s'accompagner de considérations temporelles : selon Lloyd Morgan (1852-1936), « l'évolution émergente » expliquerait qu'au cours du temps, des structures complexes et nouvelles aient émergées. Ces deux manières de penser l'émergence (spatialement en structure par niveaux d'organisation ou dans le temps), se définit respectivement comme l'émergence synchronique et l'émergence diachronique. Morgan L. et Mulcey M., en proposent une définition ainsi :

« (...) La première, parfois identifiée au modèle « statique » ou « synchronique », relève, selon Morgan, d'une abstraction⁸⁵. Elle correspond à l'attitude intellectuelle qui vise à comprendre au sein d'un système complexe ce qui caractérise chaque niveau et les rapports qu'ils entretiennent entre eux.

La seconde, qu'on rattache au modèle « dynamique » ou « diachronique », s'accorde ici avec la théorie de l'évolution, tout en privilégiant une histoire non pas gradualiste et darwinienne, mais qui procède par ruptures et « synthèses sélective⁸⁶. » (p. XI)

De nos jours, de nombreux domaines scientifiques continuent de se réclamer de l'émergence. C'est le cas par exemple de la *biologie des systèmes*, de la *cybernétique*, de la *climatologie* etc... Ils s'appuient entre autres sur le boom occasionné par le développement fulgurant des mathématiques liées à la *théorie du chaos*, aux *fractales*

⁸⁵ Morgan, cité par Mulcey : « Le monde concret que nous cherchons à interpréter est une affaire en cours. Nous pouvons bien sûr, comme principe de méthode tout à fait légitime, prendre un instantané intellectuel du cours fluctuant des événements ; et nous pouvons par conséquent considérer l'immobilité dans l'abstraction. Mais, dans les faits concrets, il n'y a pas d'immobilité. », in *Emergent Evolution*, 1923, p.66.

⁸⁶ Kim J., *Trois essais sur l'émergence*, p. X.

et aux *systèmes non-linéaires*. Ces conceptions mathématiques complexes mettent en valeur des notions telles que la *brisure de symétrie*, d'énormes fluctuations des équations sensibles aux conditions initiales ainsi qu'une notion de « *chaos déterministe* ».

Ainsi, une autre critique du réductionnisme provient, comme mentionné dans la partie précédente, des *systèmes complexes* présents aux différents *niveaux d'organisation*. Du grec *syn histanai* (=placé ensemble) et du latin *cum plexum* (=tissé ensemble), les termes *système complexe* impliquent que beaucoup d'éléments sont liés ensemble, et qu'il est difficile d'en comprendre clairement les interrelations. Ces systèmes peuvent rendre compte de phénomènes physiques (par exemple les phénomènes météorologiques), comme de phénomènes ou de structures biologiques (la mitose par exemple, ou le système nerveux central des humains). De plus, étant constitués d'un grand nombre d'éléments interagissant de manière non « simple », ils présentent des caractéristiques très particulières et on les associe souvent à des notions telles que : *la non-linéarité, l'irréversibilité, la brisure de symétrie, l'émergence, la hiérarchie, l'historicité*, etc... Selon Jodoïn :

« *Les systèmes complexes présentent généralement des composantes qui sont, à un certain degré ou à un autre, indépendantes et donc autonomes dans leur comportement, tout en subissant diverses interactions ; il en résulte un comportement global du système difficilement prévisible*⁸⁷ ».

Ces notions d'*imprévisibilités* peuvent, selon lui, « déstabiliser l'approche réductionniste » : les systèmes complexes soulèvent des problèmes liés aux grands nombres et à la statistique, mais aussi au problème de la « *Réalisation multiple* » ; problèmes que nous détaillerons donc dans cette partie consacrée aux systèmes complexes. Il est crucial de comprendre les rapports épistémologiques qui se tiennent entre les différents niveaux d'organisation, car le cas de *l'émergence de la vie* se tient précisément comme un exemple qui condense l'enchevêtrement de nombreuses structures et systèmes complexes, comme mis ensembles. Depuis l'apparition de la vie, on décrit le réel en utilisant des catégories propres aux sciences biologiques : *fitness, survivabilité, altruisme* etc... Alors que ces descriptions ne faisaient pas de sens avant cette apparition, cette « émergence ». De plus, on observe une telle complexité dans les interactions que l'on observe systématiquement des références à la non-linéarités lorsque l'on aborde les systèmes biologiques. Ainsi, il s'agira de relire ces éléments propres aux systèmes complexes en tenant compte des conclusions tirées de la partie précédente. Est-il possible d'inclure les systèmes complexes dans la fonctionnalisation basées sur la métaphysique des pouvoirs ?

Pour Westerhoff, c'est cette *non-linéarité* qui est au centre des débats holistiques et réductionnistes : il n'est pas possible de comprendre la biologie en faisant appel aux conceptions de la microbiologie et de la biochimie (et encore moins par la physique). Pour lui, ce fossé serait creusé par la non-linéarité essentielle propre à ces systèmes biologiques : « *these cannot be understood by the simple addition of the behaviour of the components in isolation*⁸⁸ ». En effet, la vie telle que nous l'observons autour de nous présente de nombreuses interrelations complexes et imbriquées les unes

⁸⁷ JODOIN L., « L'émergence et la réalité des états compatibles inobservables : le cas de l'entropie », p. 322.

⁸⁸ WESTERHOFF & KELL, « The Methodologies of Systems Biology », p.36.

aux autres, et elle entretient des rapports non-linéaires dont la causalité effective est compliquée à appréhender. Il s'agira donc de tenter de comprendre les liens de causalités qui existent entre ces structures.

En parallèle, la théorie de l'évolution démontre que ces systèmes complexes ont aussi une historicité : il est donc crucial de comprendre comment ces systèmes complexes se caractérisent dans leurs relations structurelles d'une part, et comment ils s'inscrivent dans le temps cosmologique d'autre part. Dans ce chapitre 4, nous essaierons de retracer le statut *épistémologique* et *ontologique* des systèmes complexes selon leur structure et leurs niveaux d'organisation. Il s'agira de se questionner si le concept *d'émergence* permet aux sciences spéciales de la biologie d'effectuer un « *saut ontologique et épistémologique* », ou si l'émergence n'est qu'une expression complexe de processus ontologiquement réductibles à la physique, mais dont le statut épistémologique se différencie de ses niveaux fondamentaux. En fait, il s'agira de voir comment considérer l'émergence en tenant compte des conclusions intermédiaires que nous avons tirés dans la partie précédente, à savoir qu'il soit possible de concéder aux sciences spéciales un intérêt explicatif d'un point de vue épistémologique, mais d'en concéder la part ontologique à la physique. Ainsi, il deviendra pertinent d'appliquer ce raisonnement au cas de l'émergence du vivant : est-ce un phénomène complexe et émergent, invincible contre toutes formes de réductions, ou est-ce un phénomène dont la base ontologique se situe dans la physique fondamentale mais qui arrive à conserver ses attraits épistémologiques dans la science spéciale de la biologie ?

4.1 Biologie des systèmes, organicisme et systèmes complexes par rapport à l'émergence synchronique du vivant

Lorsque l'on étudie les systèmes de la biologie, on réalise rapidement qu'il existe de nombreux chevauchement des systèmes les uns sur les autres et qu'il y a une forme « d'organisation » dans leurs interactions. Cette organisation semble posséder un rôle très particulier, d'autant plus que selon certains scientifiques, on peut tenter de la comprendre en faisant abstraction de la matière sur laquelle elle survient. Ainsi, pour J. Woodger (1894-1981), les organismes se comprendraient comme « *leurs composants chimiques + leurs relations d'organisation*⁸⁹ », tandis que pour R. Rosen, « *(one) can throw away the matter and study the organization* ». Pour ce dernier, l'état et les dynamiques des particules fondamentales des systèmes semblent secondaires par rapport à leur ordonnancement respectif. Il ne serait pas possible d'en comprendre la nature si on ne les prenait pas en systèmes et dans leur totalité : si on ne s'intéresse qu'aux particules, alors on ne voit jamais de forêt malgré la présence d'arbres. Ainsi, selon ses mots adressés à sa fille, Rosen dit :

« The human body completely changes the matter it is made of roughly every 8 weeks, through metabolism, replication and repair. Yet, you're still you --with all your memories, your personality... If science insists on chasing particles, they will follow them right through an organism and miss the organism entirely. »

Comme en analogie avec le bateau de Thésée⁹⁰, il faut comprendre les subtilités qui existent entre les briques des constituants et l'objet constitué. Il semble en effet

⁸⁹ J. Woodger, *Biological Principles*, (1936).

⁹⁰ « *Le navire à trente rames sur lequel Thésée s'était embarqué avec les jeunes enfants, et qui le ramena heureusement à Athènes, fut conservé par les Athéniens jusqu'au temps de Démétrius de*

aller de soi qu'on ne puisse pas comprendre un corps humain en ne tenant compte que de ses quantités d'atomes (un corps humain n'est pas uniquement égal à n moles d'azote, de carbones, d'hydrogène etc...), mais qu'il faille aussi tenir compte de la nature de ses propres organisations - du rapport qualitatif qui existe parmi ses interactions. En fait, la vie n'est pas identifiable d'une manière quantitative. Si l'on prend une cellule, on remarque qu'elle opère des centaines de types de réactions métaboliques impliquant des centaines de types de molécules différentes, mais qu'on ne peut pas dire que la « vie » se trouve dans une réaction particulière. La vie n'est pas localisable, pas plus dans cette cellule que dans un être humain : c'est le fonctionnement simultané des organes (reins, foie, cœur etc...) qui font qu'un humain est considéré comme « en vie ». On ne trouve pas « la vie » dans ces éléments pris séparément, mais on l'observe lorsque l'on prend l'ensemble en entier. C'est pour cela que l'on peut trouver séduisante l'idée de dire que « la vie » émerge des systèmes et sous-systèmes de la matière. En fait, une particularité de la vie est sa tendance à former des structures à plusieurs niveaux hiérarchiques, et d'imbriquer des systèmes dans des systèmes. Ainsi, les cellules forment des tissus, qui eux-mêmes forment des organes, qui enfin forment des organismes ; mais tous ces échelons sont interdépendants et s'influencent mutuellement. Ces systèmes auraient un double rôle : ils seraient à la fois intégrés à un Tout, mais aussi autoorganisés afin de préserver une forme d'autonomie. Il devient ainsi tentant de réfuter les postures réductionnistes qui entendraient se focaliser sur les éléments fondamentaux, en adoptant un point de vue émergentiste et holiste. Il y aurait ainsi, à ces niveaux d'organisations hiérarchiques, des lois qui n'existeraient pas aux niveaux inférieurs. Par exemple, la température d'un gaz en thermodynamique se mesure en prenant l'état de l'ensemble : on ne mesure pas de température (thermodynamiquement parlant) au niveau quantique d'une particule isolée.

En ce qui concerne l'apparition de la vie, la chimie prébiotique entend suggérer que le phénomène de la « vie » serait justement émergé de ce genre de systèmes. On ne sait pas vraiment comment puisqu'il nous manque des données fossiles et parce que nous n'en connaissons pas les étapes ; mais on imagine que cela serait reproductible (à condition d'en comprendre les mécanismes). Aujourd'hui on part du principe que 1) La vie prend son origine de la matière inerte, qui aurait évolué vers une complexité moléculaire de manière continue ; et que 2) il est possible de reproduire en laboratoire cette transition, avec nos propres moyens techniques. Bien entendu, cela est théorique car nous n'avons pas de documentation nous permettant de tracer les chemins exacts à prendre. Mais puisqu'ils semblent inconnus, ces chemins doivent-ils respecter les règles de la physique, et sont-ils donc réductibles, ou émergés ? Un élément clé de la biologie des systèmes est ainsi de parler de « propriétés émergentes » lorsqu'il n'est pas possible d'en comprendre la provenance en étudiant les niveaux plus fondamentaux ; il se pose donc par opposition aux procédés analytiques.

Cette idée de pouvoir tout décomposer analytiquement en sous-parties a traversé l'histoire des sciences depuis au moins Descartes. Mais pour Rosen, c'est un

Phalère. Ils en ôtaient les pièces de bois, à mesure qu'elles vieillissaient, et ils les remplaçaient par des pièces neuves, solidement enchâssées. Aussi les philosophes, dans leurs disputes sur la nature des choses qui s'augmentent, citent-ils ce navire comme un exemple de doute, et soutiennent-ils, les uns qu'il reste le même, les autres qu'il ne reste pas le même. » Plutarque, Vies des hommes illustres, Tome 1, Vie de Thésée, XXI.23.

problème de procéder ainsi : cela viendrait d'une mauvaise tendance qu'on aurait à appliquer des procédés mathématiques aux procédés physiques. Selon lui :

« *La physique, mais aussi toutes les sciences de la nature (leurs tournants computationnels n'en étant que l'illustration manifeste) ont pris implicitement pour habitude de donner un contenu substantiel à la thèse de Church. Cette thèse affirmant, avec de bonnes raisons, mais pas de certitude, que tout mécanisme (au sens mathématique !) peut être parfaitement émulé par une machine de Turing universelle (un ordinateur classique à mémoire infinie), on en conclut souvent, par sophisme et donc fautivement, que tout phénomène à manifestation physique est ou sera simulable par ordinateur*⁹¹ »

Pour lui, ce n'est pas parce qu'un système est physique qu'on doit pouvoir le réduire à un mécanisme au sens mathématique : ce serait une erreur de catégorie. Il faudrait ainsi étudier ces systèmes selon leurs liens, leurs patterns, leurs relations etc... plutôt que de les aborder de manière purement analytique. En fait, les propriétés de ces systèmes ne seraient compréhensibles qu'en les étudiant à travers leur Tout. Selon Capra & Luisi, « *These properties are destroyed when the system is dissected, either physically or theoretically, into isolated elements*⁹². » Même si on arrive à repérer des éléments distincts, ils n'agissent pas isolément et on ne comprend rien de leur dynamique si on ne les intègre pas dans un système. En fait, les propriétés des parties de ces systèmes ne seraient pas intrinsèques : elles ne prennent de sens que dans leur dynamique et selon leur contextualisation. On observe ainsi que cette considération peut être mise en lien avec l'approche fonctionnaliste présentée dans la partie précédente : la nature ontologique des systèmes reste physique, mais leurs fonctions respectives sont dépendantes de leur contexte et de leurs configurations dynamiques. Ainsi, le conservatisme réductionniste, en mettant de côté la part intrinsèque qu'on voudrait concéder aux propriétés physiques, accorde plutôt des pouvoirs causaux aux systèmes, à même d'intégrer fonctionnellement ces émergences. C'est en fait la dynamique et la configuration de la matière qui gagne à être étudiée comme un tout fonctionnel (propriétés des atomes du tableau périodique incluses), plutôt que les propriétés catégoriques et intrinsèques fondamentales (qu'on voudrait concéder aux atomes). En fait, pour rendre compte de la nature, on remarque que les réserves des émergentistes et des partisans de la biologie des systèmes sont pertinentes, mais pour les intégrer de manière plus concrète dans cette structure dynamique, il faut les approfondir et les clarifier. En effet, les critères d'imprédictibilité et la réalisation multiple font obstacle à cette réduction : il s'agira de clarifier les statuts ontologiques et épistémologiques de ces phénomènes d'émergence. Y a-t-il réellement une émergence et une discontinuité entre les niveaux d'organisation ?

4.2 Problèmes soulevés par l'imprédictibilité et l'inexplicabilité – l'émergentisme intégré au réductionnisme conservatif

Comme mentionné plus haut, le principal objectif de l'émergentisme est de dégager un espace conceptuel propre à une relation qui existe entre des niveaux

⁹¹ Varenne F., "Théorie mathématique des catégories en biologie et notion d'équivalence naturelle chez Robert Rosen », p. 23-24.

⁹² Capra & Luisi, *The Systems View of Life*, p. 65.

d'organisation, mais aussi de soutenir l'indépendance de cet espace vis-à-vis des niveaux plus fondamentaux. Il s'agit de « déclarer l'indépendance » *épistémologique* d'un niveau d'organisation (sans que cela n'implique nécessairement une forme d'indépendance *ontologique* avec le niveau fondamental, comme nous le verrons). Il convient en effet, pour les postures émergentistes qui réaffirment leur lien avec le physicalisme, d'être à la fois en *continuité* et en *discontinuité* simultanément avec celui-ci. En bref, « *il s'agit de concilier une relation de dépendance (relative) avec un état (relativement) autonome*⁹³. » Autrement, l'émergence serait soit accusée de nier la complétude de la physique en niant ses lois, soit de redondance puisqu'elle ne ferait que reformuler les propriétés des processus microscopiques. On observe que les revendications de l'émergentisme ainsi présentées peuvent être incorporées à la notion de « *division du travail épistémologique*⁹⁴ » que nous avons abordée dans le chapitre 3.4. En effet, le *réductionnisme conservatif* permet de sauvegarder le statut épistémologique des conceptions émergentistes, puisque le niveau de détail apporté par leurs conceptions décrit avec pertinence de nombreuses interactions à leurs niveaux d'organisation respectifs, tout en affirmant que ces niveaux sont causalement liés et ontologiquement réduits au niveau fondamental de la physique. Mais Bunge ne souscrit pas à cette conception : pour lui, une propriété complexe peut être émergente lorsqu'elle est « qualitativement nouvelle », c'est-à-dire qu'elle présente « *une propriété qui n'est pas possédée par aucun de ses constituants ou précurseurs*⁹⁵. » Cette qualité aurait un pouvoir causal. Et cette « nouveauté » se fonderait sur des notions telles que « *l'inexplicabilité* » ou « *l'imprédictibilité*⁹⁶ » en fonction de la théorie ou du « set » d'informations donné. Pour Kim, ces deux points font partie des dogmes de la doctrine des émergentistes, et il les définit ainsi :

- « *L'imprédictibilité des propriétés émergentes* : les propriétés émergentes ne sont pas prédictibles à partir de l'information exhaustive concernant leurs « conditions de base (à l'inverse des propriétés résultantes)⁹⁷. »
- « *L'inexplicabilité et l'irréductibilité des propriétés émergentes* : les propriétés émergentes, à la différence de celles qui sont simplement résultantes, ne sont ni explicables par leurs conditions de base ni réductibles à celles-ci⁹⁸. »

Ces deux éléments, partant des théories explicatives et épistémologiques, serviraient ainsi à justifier un « *ajout à l'ontologie du monde*⁹⁹ » par les « pouvoirs causaux » des systèmes émergents désignés. Prenons un exemple : si on met un coup de pied à une pierre, cette pierre réagira au choc et suivra une trajectoire linéaire et calculable par les lois de la mécanique newtonienne. Cependant, si on met un coup de pied à un chien (ne le faites pas), alors celui-ci réagira d'une manière imprévisible et non-linéaire, en suivant des changements structurels profonds et complexes liés à sa nature d'être vivant. Il y aurait donc quelque chose d'imprédictible dans les conséquences causales d'un système complexe ; une forme d'émergence. Par ailleurs, une propriété ne peut pas être *ontologiquement* distincte des propriétés physiques fondamentales, comme nous l'avons vu dans la partie précédente. Il s'en suit que le

⁹³ Westerhoff & Kell., « The Methodologies of Systems Biology » in *Systems Biology*, p. 36

⁹⁴ Esfeld M., « Les fondements de la causalité »

⁹⁵ Bunge M., *Emergence and Convergence*, Toronto, Toronto University Press, 2003, p. 17

⁹⁶ Jodoin L., « L'émergence et la réalité des états compatibles inobservables: le cas de l'entropie »

⁹⁷ Kim J., *Trois essais sur l'émergence*, p. 57

⁹⁸ *Ibidem*, p. 57.

⁹⁹ *Ibidem*, p. 62.

seul niveau où cette « nouvelle propriété » peut être abordée, est au niveau épistémologique. *L'imprédictibilité* ou *l'inexplicabilité* sont des notions qui ont trait au niveau épistémologique et qui ne remettent en rien en cause le statut ontologique et les relations de causalités.

Pour *l'imprédictibilité*, les *lois de correspondance* tentent de relier les domaines à réduire avec leur domaine de base, et ce jusqu'au niveau fondamental. Mais il est vrai qu'il soit nécessaire d'opérer des « fonctionnalisations¹⁰⁰ » des éléments du niveau supérieur, pour pouvoir les réduire à leur domaine de base fondamental. Et cette fonctionnalisation, selon Kim, serait un processus de réduction qui friserait avec le réductionnisme éliminativiste, sauf si l'on adopte la méthode de fonctionnalisation par sous-types décrites précédemment. En est-il de même pour ce qui est de *l'inexplicabilité* ? seraient-elles les résultantes d'une lacune épistémologique ou d'une erreur conceptuelle ? ou est-il possible d'intégrer cette *imprédictibilité* et cette *inexplicabilité* dans le modèle du réductionnisme conservationniste ? C'est ce que nous allons tenter de comprendre.

En fait, ces *critères* nous intéressent énormément car notre objet d'étude, l'apparition de la vie, ne bénéficie pas pour le moment d'une modélisation fiable ni reproductible dans son intégralité (pour une expérience réalisée dans le but de la reproduire, voir l'expérience de Miller). Mais l'inexplicabilité en tant que telle de l'émergence du vivant n'est pas gravée dans la roche : elle est inexplicable car nos modèles actuels ne peuvent pas encore rendre compte de cette émergence, et parce que nous manquons cruellement de données empiriques. Et elle est *imprédictible* pour les mêmes raisons : nous manquons certainement de la puissance de calcul qu'il faudrait pour résoudre des problèmes mathématiques liés à la théorie du chaos. La physique regorge de domaines où il est nécessaire de faire appel à des calculs stochastiques et probabilistes pour en décrire des modèles, c'est le cas par exemple de la thermodynamique (que nous approfondirons plus bas) ; pourtant on ne prétend pas qu'elle soit une discipline mal fondée, imprédictible ou indéterminée. Ce qui manque, ce sont des données ; mais sur le principe les choses sont compréhensibles. Si nous avions des descriptions exactes des structures microphysiques de toutes les particules, ainsi qu'une machine pour les traiter dans leur intégralité, alors, comme le Démon de Laplace mentionné en partie 3, nous pourrions certainement établir des modèles prédictibles fiables. En effet, la complétude de la physique, comme mentionné au chapitre 3, dépend largement du caractère explicatif-causal fondamental. Ainsi, d'après Westerhoff, cette inexplicabilité pourrait provenir de l'incompréhension qui existe entre les physiciens et les chimistes/biologistes en termes de *méthodologie*, mais aussi par nos *lacunes empiriques* dans les objets de recherches. S'il n'y avait pas ce lien ontologique (entre les niveaux d'organisation et le niveau fondamental), alors il y aurait des phénomènes sans explication physique ; l'émergentisme ne serait pas un concept matérialiste ou physicaliste mais une forme d'approche qui friserait avec le dualisme. Il est vrai que relier les niveaux à la même base ontologique implique un engagement fort : la physique et les sciences spéciales reliées ainsi ne seraient que des sciences idéales basées sur des modèles ; il reste encore à découvrir l'armature empirique qui pourrait aider à corroborer ces postulats, pour le cas de l'émergence du vivant.

Pour en revenir à l'imprédictibilité, au niveau méthodologique, les hypothèses formulées par les chimistes et les biologistes ne respecteraient pas les prérequis pour

¹⁰⁰ Kim J., *Trois essais sur l'émergence*, p. 52.

constituer des théories strictes, testables et falsifiables, critères qui seraient indispensables pour être une « science sérieuse¹⁰¹ ». En fait, comme Rutherford en plaisantait avec dédain, la biologie paraîtrait être considérée comme étant une activité de « *collection de timbres* ». L'inexplicabilité serait ainsi, possiblement, un fardeau porté par la seule biologie, car ses méthodologies ne seraient pas conformes aux normes scientifiques. Il faudrait, pour expliquer les systèmes complexes selon leurs bases physiques, que la biologie « fasse un effort » de clarté et qu'elle, en fait, se « réduise d'elle-même » ontologiquement à la physique. D'un point de vue empirique, il avance que l'on ne possède tout simplement pas de données qui nous permettent de bien cerner les mécanismes décrits par la biologie : « (...) *Electric field effects on transmembrane movements of ions cannot be vested in physics and chemistry because too much of the details of the transport matters and is in fact unknown (...) none of these structures (in biology) can be calculated ab initio, precisely because the interactions are nonlinear, and with many interactions depending on other interactions (...) most such reaction mechanisms cannot be verified in terms of precise physics and chemistry. The same is true for the pathways of processes that make living cells operate*¹⁰² ». Il nous manquerait donc des données et des outils efficaces. Ainsi, les critiques adressées au réductionnisme par l'émergentisme seraient essentiellement dues à des lacunes épistémologiques, et ne concerneraient d'ailleurs que ce dernier domaine (le statut *d'ontologie nouvelle* recherché étant impossible et non-négociable sans tomber dans une forme de dualisme).

Mais même si les données empiriques nous manquent et qu'il soit difficile de s'en faire une idée, il n'est tout de même pas impossible de parvenir à une explication, ni de comprendre de quelle manière l'on peut obtenir les « sauts qualitatifs » faisant passer du pré-biotique au biotique. De plus, de par les postulats de la *métaphysique naturaliste*, il est plausible de présupposer qu'il y ait une explication tangible et possible qui ferait appel à nos connaissances de la Nature. En effet, en présupposant que la causalité existe comme principe et qu'elle opère aux niveaux micros et macros, en défendant une complétude de la physique, et en affirmant que les *systèmes complexes* peuvent être compris comme étant ontologiquement lié au monde physique, on avance alors que le cas de l'émergence de la vie est lui aussi ontologiquement lié à la physique et qu'il est donc compréhensible. Il n'y aurait pas besoin de faire appel à une force supplémentaire *émergée* de ces interrelations complexes (par exemple un « élan vital ») : les sciences de la nature pourraient très bien parvenir à une description du phénomène. Mais il faudrait pour cela opérer une fonctionnalisation des structures dynamiques propres à la vie : chose qui ne sera possible qu'a posteriori, une fois que les conditions cadres et les structures impliquées dans l'émergence du vivant seront mieux clarifiées. Ces conditions et ces structures sont peut-être très floues en l'état actuel, mais il n'est théoriquement pas impossible d'y avoir accès.

Pour détailler, même si l'émergence des *systèmes rétroactifs* propres à la *cybernétique des systèmes* (par exemple le système hormonal humain) indique des relations complexes et nouvelles (même si elles sont imprédictibles ou inexplicables), on ne peut pas concevoir que ses composants (les enzymes ou les hormones par exemple) soient *ontologiquement* irréductibles par rapport à leurs constituants physiques. Les dynamiques des systèmes émergents sortent peut-être du *mécanisme* pur et dur, *prévisible et linéaire* pour entrer dans des conceptions *systémistes, probabilistes*

¹⁰¹ Westerhoff & Kell, « The Methodologies of Systems Biology », p.37.

¹⁰² *Ibidem*, p.37.

et non-linéaires, mais cela ne signifie pas que le principe de causalité basé sur un niveau fondamental soit nié, et qu'il soit possible de négliger le niveau physique. Cela signifie simplement que le déterminisme causal est troqué pour une causalité expliquée de manière statistique et probabiliste (ces conceptions renvoient à 3.4, à la sous-partie sur la métaphysique humienne, et seront détaillées dans la partie 5.1), ou alors qu'elle adopte des *effets de seuils* non-linéaires, dont les dynamiques sont sensibles à des *masses* ou à des *niveaux critiques*.

En outre, on remarque que les systèmes décrits par les concepts d'émergence peuvent épistémologiquement (et non ontologiquement) être considérés à la fois comme « basiques » et « émergents », selon le niveau d'organisation duquel on évalue un phénomène émergent : il y a donc une forme de relativité dans ce concept. Ainsi, un niveau peut être à la fois inférieur et supérieur par rapport aux autres niveaux. Kim aussi parle de « causalité descendante¹⁰³ » ainsi que de « causalité ascendante », pour lui « cela suggère à son tour une hiérarchie ordonnée de domaines », ce qui fait comprendre qu'un système peut être « supérieur » ou « inférieur » à un autre. Par exemple, le cas de l'émergence de la vie se situerait à un niveau macro par rapport aux atomes, puisqu'il s'articule certainement sur des relations moléculaires, mais il serait à un niveau micro par rapport aux cellules issues des processus biologiques. Mais cette « causalité descendante » implique-t-elle un statut ontologiquement distinct au « niveau supérieur » d'où elle descend ? Et d'après Kim, à nouveau, « *(une cause descendante) peut être représentée tout aussi bien par des concepts et des langages de niveau inférieur, et une unique relation causale serait descriptible dans différents langages (...) elle peut suffire à sauver l'explication causale descendante¹⁰⁴* ». En fait, il est possible de conserver une explication causale descendante, mais il n'est pas possible de nier le niveau fondamental comme étant le support ontologique, comme expliqué dans la partie 3 sur la causalité. Kim souligne l'intérêt de ce cette idée, et avance que « *les idées émergentistes peuvent nous aider à comprendre les relations interniveaux entre les éléments des niveaux adjacents d'après cette hiérarchie, et, en fin de compte, comment toute chose est reliée aux éléments du niveau physique ultime¹⁰⁵* » : il est clair pour lui qu'une approche de l'émergentisme est compatible avec le réductionnisme conservationniste. De plus, cette approche suggère qu'il est possible de sauver la « causalité descendante » : elle n'est réduite qu'ontologiquement, tandis qu'elle conserve sa valeur épistémologique. Ainsi, le critère d'inexplicabilité cité plus haut est discernable dans ses causalités : elles sont nécessairement et ultimement réductibles au domaine physique, mais les intégrer et les conserver dans une conception du monde est bénéfique puisque cela facilite nos représentations du monde.

Ainsi, on considère que les systèmes émergents des systèmes supérieurs sont des descriptions « coarse-grained », tandis que le niveau fondamental opère des descriptions « fine-grained » : c'est que le « vrai travail causal¹⁰⁶ » (ontologique) du monde est opéré par le niveau fondamental de la physique. Cette distinction de niveaux hiérarchiques entre coarse-grained et fine-grained implique déjà une forme de subordination ontologiquement placée aux niveaux les plus bas : il y a des processus de réduction donc déjà aux niveaux des conceptions complexes. Et s'il y a déjà des processus de « réduction » dans les conceptions *émergentiste*, alors il ne s'agit que de faire quelques pas supplémentaires pour réduire jusqu'au niveau le plus fondamental :

¹⁰³ Kim J., *Trois essais sur l'émergence*, p. 53.

¹⁰⁴ *Ibidem*, p. 74-75.

¹⁰⁵ *Ibidem*, p. 54-55.

¹⁰⁶ Jodoin L., « L'émergence et la réalité des états compatibles inobservables: le cas de l'entropie »

celui des particules. La « causalité descendante » permet à l'émergentisme de conserver une utilité, mais cette dernière est strictement d'ordre épistémologique : elle permet d'étoffer notre « équipement représentationnel » pour « l'interprétation conceptuelle et descriptive des différents niveaux hiérarchiques ». Ainsi, l'émergence n'est pas un concept foncièrement antiréductionniste puisqu'il le pratique, mais il se dresse quand même contre le *réductionnisme éliminativiste*. Toute cette conception de l'émergence, d'un point de vue ontologique comme épistémologique, s'inscrit donc dans une alternative ni antiréductionniste ni éliminativiste : celle du *réductionniste conservationniste* cité plus haut. En outre, l'inexplicabilité ne dénote pas forcément d'une indépendance ontologique : elle démontre juste que les interrelations ne sont pas aussi transparentes qu'à l'accoutumée et que les évidences des liens causes/effets ne sont plus aussi probants. Mais ces liens causes/effets ont toujours comme « base » le niveau fondamental, et il n'est donc pas possible de justifier une différenciation ontologique.

4.3 Les réalisations multiples

Mais cette stratification des niveaux épistémologiques fait « surgir » un autre problème : celui des *réalisations multiples*. Selon Wimsatt, la réalisation multiple survient lorsqu'un *macro-état* d'un niveau supérieur du système peut se voir associé à *plusieurs micro-états* du système à un niveau inférieur. Par exemple en physique, *plusieurs états dynamiques* des molécules peuvent être compatibles avec *une* même propriété thermodynamique. Et en biologie, *plusieurs* combinaisons d'ADN au niveau génotypique (niveau micro) peuvent être associées à *un seul* trait phénotypique (niveau macro). Cette occurrence serait la conséquence logique de la hiérarchie même des niveaux d'organisation, et de leurs capacités épistémologiques respectives. En effet, encore selon Wimsatt : « *la réalisabilité multiple est une conséquence de l'existence des niveaux d'organisation : puisque les descriptions des entités et des propriétés aux niveaux supérieurs le sont de manière plus « grossière » (coarse-grained), il y a moins de descriptions de macro-états distinguables que de descriptions de micro-états distinguables*¹⁰⁷ ». En fait, les propriétés décrites par les niveaux inférieurs auraient un meilleur niveau de détails, mais seraient moins générales que les descriptions des niveaux supérieurs. En somme, la réalisation multiple est la conséquence de deux éléments, elle découle : « (1) *du nombre beaucoup plus grand d'états possibles et distinguables à un certain niveau (micro-états) que d'états à un niveau supérieur associé (macro-états), principalement en raison de la plus grande précision du vocabulaire employé pour décrire les micro-états, et (2) de l'identité numérique du système de niveau supérieur avec le système de niveau inférieur ainsi décrit*¹⁰⁸ ».

Toujours selon Wimsatt, une conséquence intéressante de cette réalisabilité multiple est « *l'autonomie dynamique et donc l'autonomie explicative des variables et relations causales de niveaux supérieurs, car il y aurait stabilité relative des caractéristiques de niveaux supérieurs malgré les changements incessants aux niveaux inférieurs*¹⁰⁹ ». Ces systèmes ne verraient donc pas de changement au niveau macro, malgré les changements au niveau micro, et il n'y aurait donc pas de « conséquence

¹⁰⁷ Wimsatt W., « Emergence as Non-Aggregativity and the Biases of Reductionisms »

¹⁰⁸ Jodoin L., « L'émergence et la réalité des états compatibles inobservables: le cas de l'entropie »

¹⁰⁹ Wimsatt W., *op cit.*

causale » à un changement d'état au niveau plus bas. Ainsi, Wimsatt considérerait que par exemple la biologie pourrait à certains égards être vue comme autonome, et qu'elle n'aurait pas besoin de se référer à d'autres sciences pour valider ses thèses. Il est difficile de mesurer si l'émergence de la vie en tant que telle serait en partie la source de cette « autonomisation » d'un point de vue épistémologique. En fait, il semble curieux de parler « d'autonomisation » des systèmes complexes de la vie, surtout lorsque l'on parle du premier phénomène vivant au niveau temporel : celui de l'émergence de la vie. Puisque que l'on considère que la vie a émergé sur des bases physiques, il y a probablement eu des interactions entre des systèmes complexes d'ordres physiques, et non d'ordre biologique (puisque les systèmes biologiques n'existaient pas encore). À moins que l'on considère que les systèmes pré-biotiques soient déjà intégrés à la biologie. Dans tous les cas de figures, il devient compliqué d'imaginer une dissociation claire entre domaine de la biologie et domaine de la physique en ne se basant que sur des critères liés aux systèmes complexes : pourquoi un système complexe serait à un moment considéré comme appartenant à la physique, puis à partir d'une « masse critique » comme appartenant à la biologie ? En fait, la biologie ne peut « conquérir » son intérêt épistémologique que d'un point de vue diachronique : c'est dans le temps que ses catégories sont apparues, une fois que la matière ait suivi de longs processus.

En outre, l'émergence du vivant serait-elle un phénomène unique d'où toute la vie en proviendrait, ou y a-t-il de nombreuses configurations de micro-états causaux pouvant amener au macro-état de la vie ? Ainsi donc, si le premier « événement » biologique, bien que certainement très complexe, se base nécessairement sur des phénomènes d'ordre « physique », alors tous les systèmes complexes émergés durant l'évolution (et donc liés à ce « premier événement ») peuvent être causalement liés aux phénomènes fondamentaux, puisqu'ils les touchent. Mais on ne sait pas si les micro-états qui ont conduit à la vie se sont « coalisés » dans un épisode unique, ou s'il y a eu de multiples occurrences de l'évènement, avec des configurations de micro-états très diversifiées et non similaires.

Par ailleurs, on ne sait encore rien de la « temporalité » de cette émergence, et si oui ou non elle a présenté des fonctions de micro-états telles que la « robustesse », la « stabilité » ou le « transfert d'information » ... Comme le disait Westerhoff, il nous manque énormément de données empiriques pour seulement pouvoir vraiment distinguer ce qui est de l'ordre complexe et émergent de ce qui est de l'ordre du fondamental. Est-il seulement possible de savoir si les mécanismes d'apparition de la vie sont le fruit d'un saut qualitatif fulgurant, ou si le passage de l'inerte au vivant a été lent et laborieux ? En fait, à partir de quel moment cosmologique la biologie commence-t-elle à véritablement avoir un objet d'étude sur lequel son statut de science spéciale devient pertinent et se voit dissocié épistémologiquement des sciences fondamentales ? Car il a bien fallu un niveau d'organisation précis, ou un moment « T » dans l'histoire de l'univers où « l'utilité » de la méthodologie en biologie ait pu revendiquer une mise en application. Mais il semble nécessaire que le « travail causal » soit ontologiquement opéré par le niveau fondamental de la physique. Il faut donc partir de cette base, et tenter de discerner les nuances causales qui existent entre les niveaux d'organisation.

Ainsi, pour en revenir au décalage de l'impact de causalité entre le « fine grained » et le « coarse grained », prenons un cas concret et observons le décalage micro/macro que l'on constate en épigénétique : certaines mutations au niveau ADN

(micro) peuvent être sans conséquences au niveau du phénotype (macro)¹¹⁰. Mais cette absence de conséquences n'est pas suffisante pour considérer les sciences spéciales comme autonomes. Par exemple, on observe donc en génétique (ou en épigénétique) que certaines mutations de l'ADN, bien que changeant la « base génétique » du chromosome par exemple lors de sa traduction, ne produisent aucuns effets phénotypiques. Mais cela est dû à des pertes d'informations et à l'épissage génétique, qui font que l'information de l'ADN n'est pas intégralement traduite stricto-sensu en protéines : seules des sections entières du chromosome opèrent ces traductions en protéines (1 seul « faux » codon issu d'une traduction « mutante » n'implique pas une protéine nouvelle). On observe une stabilité au niveau phénotypique ou au niveau de la synthèse de la protéine, alors qu'on observe une mutation au niveau plus fondamental : cela ne signifie pas l'absence de causalité, mais juste que des mécanismes complexes « filtrent » ou « diluent » les effets de ces causes pour certaines raisons (il est difficile de parler de « raison » sans risquer de verser dans la *téléologie*, mais on observe que ces mécanismes d'épissage peuvent parfois garantir la robustesse ou le fitness d'un système, par exemple). On remarque par ce cas, que l'autonomie des sciences spéciales issues de ces émergences n'est garantie qu'à un niveau épistémologique : la biochimie et la biologie moléculaire expliquent bien les mécanismes de l'épigénétique. Mais ce mécanisme est ontologiquement fondé sur les états physiques de ses particules fondamentales : l'autonomie des sciences spéciales est donc envisageable d'un point de vue épistémologique, mais pas au niveau ontologique. En fait, on remarque même que cette émergence structurelle participe clairement à l'identification des fonctions par causalité descendante, et contribue donc à éclaircir épistémologiquement les processus biologiques. La causalité ascendante allant des gènes vers les protéines, les tissus etc... est ontologiquement sûre, mais c'est par causalité descendante, en partant de l'organisme dans son entier, qu'est déterminé quelle protéine devrait être fabriquée et quand : les fonctions du Tout sont instillées par une forme de causalité descendante allant de l'ensemble (complexe) vers les gènes (plus simples).

Ainsi, la réalisation multiple ne nie donc pas le réductionnisme, tandis que ce dernier permet aussi de conserver la valeur épistémologique des sciences spéciales (dans ce cas-là, la biologie). En somme, la réalisabilité multiple est certes une conséquence de l'existence des niveaux d'organisations. Mais elle n'implique pas une émergence ontologique : seul son émergence épistémologique est utilisable dans le cadre de la *métaphysique naturaliste*, grâce au réductionnisme conservatif. Cela signifie que les systèmes et les relations entre systèmes que l'on observe même dans les niveaux les plus complexes, restent ontologiquement liés à la physique : ce qui suggère que l'apparition de la vie peut être comprise en observant des phénomènes de l'ordre des sciences naturelles, physique comprise. Il y a donc continuité ontologique entre les différents niveaux d'organisation, même si des propriétés épistémologiques semblent émerger. Ce n'est donc qu'au niveau épistémologique qu'il devient indispensable de faire appel aux sciences spéciales, par besoin de pertinence ; au niveau ontologique, on doit faire appel aux sciences physiques. Ce qui signifie que la « charnière » qui existe entre le monde inerte et le monde biotique peut être ontologiquement comprise en faisant appel à des conceptions proches de la physique, puisque cette « charnière » est justement le moment où le monde inerte et physique a touché le plus étroitement les monde biotique et biologique. C'est le moment où on observe les débuts des premiers

¹¹⁰ Pour la réduction, voir SACHSE C., « La génétique classique : étude de cas de réduction ontologique » et « La génétique classique : étude de cas de réduction épistémologique », in *Philosophie de la biologie*.

systèmes complexes vivants : ceux qui ont débouchés sur les systèmes extrêmement complexes du vivant que l'on connaît aujourd'hui et qui ont nécessités l'utilisation des sciences spéciales que l'on connaît. Mais lors de ce moment « T » où la vie a émergé, était-il dès lors nécessaire de faire appel aux sciences spéciales de la biologie, ou était-il possible de comprendre ce système en ne faisant appel qu'aux seules sciences fondamentales ?

4.4 Emergentisme et réductionnisme conservatif

Ainsi, on a vu qu'il était possible d'intégrer cet émergentisme dans l'ontologie de la physique : les systèmes complexes offrent des manières de comprendre la dynamique de la matière à travers ses différents niveaux d'organisation, malgré les lacunes que l'on a dans la description même de ces processus. En fait, par ses configurations et ses mises en relation, la matière « adopte » des propriétés : de la même manière que les particules adoptent une charge ou un spin selon leur configuration au niveau des atomes, elles adoptent aussi des propriétés moléculaires passé un certain niveau, et ainsi de suite jusqu'aux molécules les plus complexes. Il n'y a que des propriétés distinguables selon le « niveau » auquel on s'intéresse : l'émergence dépend de ce contexte et de ce niveau dans les adéquations causales qu'on y trouve au niveau épistémologique ; l'ontologie reste basée sur un substrat d'ordre de la physique fondamentale. Ainsi, ces propriétés ne sont pas irréductibles par rapport à leur fondement : il ne s'agit que d'occurrences de propriétés que l'on observe à un degré précis. Il n'y a pas de changement de loi ou de principe métaphysique qui ferait qu'un niveau d'organisation serait nouveau et indépendant par rapport à sa base : la seule chose qui change fondamentalement, c'est la présence de structures matérielles ainsi que leur organisation, leurs configurations et leur ordonnancement. C'est pourquoi il est important non seulement de reconnaître leur base ontologique, mais aussi leurs configurations en systèmes : la part réservée aux sciences spéciales est donc importante et cruciale. Il y a donc continuité entre tous ces niveaux : quel est le statut de ce fameux « saut qualitatif » ? On pourrait supposer que la notion de « saut » ne serait qu'une impression, le résultat d'une lacune dans notre manière de comprendre ces mécanismes. Peut-être que si nous avions accès à plus de données, alors nous verrions que ces transitions entre les niveaux d'organisation sont en fait sur des trajectoires continues et discernables. Il y a évolution des structures et complexité (nous approfondirons cela dans la partie suivante), mais à quel degré est-il possible de parler de « saut qualitatif » ?

On remarque donc que les systèmes complexes et leur émergence ne se distinguent pas de la physique d'un point de vue structurel : les configurations et l'organisation de ces systèmes imbriqués les uns dans les autres conserve une base ontologiquement matérielle et physique. Comme le dit Silberstein, cette vision de l'émergentisme est réductionniste quant aux « *objets et aux entités* », mais pas pour les « *propriétés*¹¹¹ ». Pour lui : « *en ultime instance, le monde est constitué d'un petit nombre d'entités mais leurs combinaisons et les processus d'émergence qui en découlent confèrent aux nouveaux objets ainsi obtenus des propriétés qu'il semble illusoire, pour des raisons épistémiques, de penser pouvoir réduire, plus encore,*

¹¹¹ Silberstein M., "Introduction", p. 11

*éliminer du lexique même de la science*¹¹² ». On en revient à cette « division du travail » entre les sciences fondamentales et les sciences spéciales.

En fait, l'intérêt épistémologique de l'émergentisme de la biologie des systèmes est crucial. En effet, les formes que peut prendre la matière sont tellement complexes et multiples qu'il devient inconcevable d'y mettre de l'ordre sans faire appel à une systématisation méthodique. Pour Silberstein : « *Le pluralisme des propriétés est dérivé du monisme des entités et c'est dans cette relation des propriétés aux entités que se lit le principe régulateur du matérialisme, dans sa capacité à faire dériver les premières des secondes sans recourir à l'inflation des entités*¹¹³ ».

Selon cet émergentisme, ontologiquement lié à la physique et fonctionnalisable à travers des sous-types fonctionnels, il convient d'analyser les éléments des systèmes et leurs interactions entre eux, pris ensemble. Il ne s'agit pas de les séparer analytiquement ; mais de les comprendre dans leur dynamique et leurs processus simultané et entre eux. Ainsi, on ne prétend pas étudier la reproduction des chats à travers les seules propriétés des atomes, mais on doit quand même en tenir compte. En fait, cet émergentisme permet, selon Bunge, d'éviter deux écueils extrêmes : *il faut en fait « réduire » à la fois par le bas et par le haut, en étudiant à la fois les éléments et les propriétés globales des systèmes. Non pas par un vague parti pris de « juste milieu », mais parce que la science montre que le monde est réellement composé d'objets organisés en divers systèmes et sous-systèmes emboîtés, de niveaux d'organisation divers, et qui ont des propriétés émergentes*¹¹⁴ ».

4.5 Rétrospective du chapitre

Nous avons vu, dans cette partie, qu'il était indispensable de se focaliser sur une conception de la causalité qui fasse la part belle aux sciences fondamentales. Il est nécessaire qu'ontologiquement, les systèmes complexes soient réduits à la physique, comme nous l'avons montré dans la partie 3. Pourtant, *l'inexplicabilité, l'imprédictibilité et les réalisations multiples* soulèvent des interrogations qui mettent en doute nos conceptions du réductionnisme. En effet, la *non-linéarité* essentielle de ces systèmes brouille les pistes qui nous permettraient de discerner les liens de causalités entre les niveaux hiérarchiques, et il devient difficile d'en établir des systèmes réductibles à leurs micro-états. Mais pour que ces systèmes puissent être cohérents avec notre conception scientifique du monde, il faut qu'ils comprennent le pouvoir causal provenant des sciences fondamentales comme étant le plus « ultime ».

Ainsi, *l'inexplicabilité* et *l'imprédictibilité* peuvent être compris comme les résultats de nos lacunes empiriques ou méthodologiques, comme le suggère Westerhoff. C'est la responsabilité de la biologie d'acquiescer les données empiriques qui lui permettraient de se corroborer avec les modèles physiques, et non l'inverse. Cette inexplicabilité devrait donc être en principe réductible aux sciences fondamentales. Sans cela, c'est la complétude de la physique qui est remise en question.

¹¹² *Ibidem*, p. 11

¹¹³ *Ibidem*, p. 11

¹¹⁴ Deleporte P., « Le matérialisme scientifique de Mario Bunge », p. 3.

Pour ce qui est des *réalisations multiples*, on observe que les multiples micro-états n'impliquent pas nécessairement la suppression du rapport causal existant entre les différents niveaux d'organisation. L'absence de conséquences observée au niveau macro n'implique pas une absence de causalité ontologique : elle n'implique qu'un « dilution » de la causalité explicative par un rapport « fine grained » et « coarse grained ». En effet, le lien de causalité est nécessairement réel au niveau ontologique, et le lien de causalité comme décrit par les modèles théoriques reste lui aussi comme étant réel. Il n'est pas possible de revendiquer un « statut ontologique nouveau », car les systèmes complexes des niveaux hiérarchiques supérieurs n'apportent rien à la description ontologique du monde réel. C'est juste que l'impact théorique général offert est considéré comme « meilleur » lorsque l'on s'intéresse au niveau supérieur, ce qui signifie que la science spéciale qui s'applique à décrire ce niveau légitimise son statut épistémologique, puisqu'elle parvient à apporter une « plus-value » épistémologique non négligeable. Il n'y a pas redondance entre les théories, même s'il est théoriquement possible de développer des « théories image » pour réduire ces descriptions multiples (voir John Bickle au chapitre 3.3).

Ainsi, la vie serait un phénomène compréhensible selon les bases de la physique : pour comprendre l'ontologie du phénomène de l'émergence du vivant, il faut nécessairement se fier aux conceptions des sciences fondamentales, car la biologie n'acquiert pas de statut « ontologiquement nouveau » à travers les *systèmes complexes*. En effet, ces systèmes complexes peuvent être causalement et ultimement liés au niveau fondamental. Mais au niveau épistémologique, on peut accepter le statut épistémologique pertinent et légitime des systèmes complexes. En effet, grâce aux descriptions produites par les systèmes complexes, notre représentation du monde se voit renforcée, comme le suggère Kim. Ainsi, si l'on veut parvenir à une compréhension du phénomène de l'émergence du vivant, il faut concéder que les dynamiques et les systèmes qui ont aboutis à ces fonctions soient ontologiquement liés et compris comme étant des éléments fondamentaux. Mais il faut aussi concéder que les descriptions offertes au sujet des fonctions émergées par ce « saut qualitatif » sont bien mieux détaillées et utilisables si on les aborde sous l'œil des sciences spéciales. Seules peut être nous manquent des données empiriques et de la puissance de calcul pour en proposer des modèles prédictibles et explicatifs absolument conclusifs ? cette question reste très spéculative, d'autant plus que la quantité de données décrites et mobilisées pour une simple molécule est gigantesque, et qu'il y a une quantité d'atomes énorme dans une mole – le nombre d'Avogadro étant de $NA=6,022\ 140\ 76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$, soit environ six cent mille milliards de milliards : calculer avec précision des mouvements de particules pour des masses de données aussi gigantesque semble être une gageure, que nos moyens actuels en informatique semblent très loin d'atteindre. Mais s'il semble hors d'atteinte de calculer avec précision l'évolution des particules dans des quantités aussi astronomiques, il ne semble au moins pas absurde de supposer que l'on puisse un jour reproduire du vivant à partir de l'inerte, puisque cela s'est certainement déjà produit dans la Nature, à condition que l'on comprenne les processus explicites de la structure dynamique qui a engendré le vivant. Pour ce qui est des calculs avec de grandes quantités, s'il n'est pas possible d'estimer l'évolution de chaque particule prise individuellement, il existe au moins des rapports statistiques utilisables pour en déduire des lois déterministes : c'est ce que nous allons aborder dans la partie suivante.

5. Thermodynamique et flèche du temps : l'émergence diachronique

Nous avons vu dans le chapitre précédent que les systèmes complexes présentent des caractéristiques telles qu'ils font état de descriptions multi-niveaux, desquels certaines fonctions « émergent ». Nous avons émis une critique envers cette émergence, et ce spécifiquement dans sa nature synchronique et structurelle. Il s'agissait de comprendre cet émergentisme non pas comme une ontologie nouvelle, qui s'ajouterait en se distinguant de la vision physicaliste, mais plutôt comme une partie intégrable à cette métaphysique. En fait, seul le statut fonctionnel et épistémologique de ces éléments « émergeants » serait retenu, et non le statut de nouveauté ontologique. Ainsi, les éléments avancés par les tenants de l'émergentisme pour justifier une ontologie nouvelle aux niveaux de complexités supérieurs, peuvent en fait être compris comme faisant partie d'une structure dynamique, elle-même basée sur une ontologie primitive. En somme, les dynamiques relationnelles que l'on observe, ainsi que ces émergences, sont intégrables dans le modèle réductionniste conservatif. Ainsi, le cas particulier de l'émergence de la vie, qui est certainement le résultat d'un processus complexe (puisqu'il introduit une nouvelle logique interrelationnelle au niveau « macro » des entités), reste donc malgré tout ancré dans les conceptions de la *métaphysique naturaliste*. En effet, nous voyons que les propriétés émergentes sont *causalement structurelles* mais sans ontologie nouvelle, dans la mesure où « *a physical structure is a network of concrete, qualitative relations among objects that do not possess an intrinsic identity*¹¹⁵ ».

Dans ce chapitre il s'agira, en continuité avec le chapitre précédent, non pas d'approfondir la dimension structurelle et synchronique de l'émergence, mais d'en explorer la dimension *diachronique*, dans le temps. En effet, la vie semble avoir émergé sur terre à un moment spécifique, et ce moment doit donc s'inscrire dans une historicité au sein de l'univers. Il semble donc important de s'interroger sur cette notion de temporalité. En effet, les systèmes complexes se caractérisent par une dynamique temporelle qui semble faire cas d'émergences. Par exemple, les processus liés à la théorie de l'évolution montrent que la vie s'est « complexifiée ». Lorsque l'on analyse ses dynamiques, on remarque que la vie jongle avec des systèmes « néguentropiques » qui semblent contredire les principes de la thermodynamique. Dans ses processus, la vie montre des rapports avec l'information qui semblent difficiles à cerner. Ainsi, dans le temps, la vie semble faire état de systèmes complexes qui évoluent et se complexifient, de façons à ce qu'il soit difficile de comparer les systèmes précédant avec les nouveaux : il y a eu un changement dans le temps. Y a-t-il un saut ontologique à travers ces processus dans le temps ? En fait, pour le comprendre, il faut déjà se poser la question du statut de ce *temps*, et quels rapports entretiennent les systèmes complexes diachroniques avec la structure dynamique de l'univers. Est-ce que le temps est une donnée qui permette de revendiquer un statut ontologique nouveau par émergence, pour le compte des systèmes diachroniques ?

Dans une première phase, il s'agira de prendre et d'explorer un principe complexe de la physique, *la thermodynamique*. Ce principe physique est en effet très

¹¹⁵ Esfeld M. & Sachse C., « Conservative reductionism », p. 174

important : il est non seulement considéré comme universel et fondamental par de nombreux scientifiques (il pourrait même, comme nous le verrons plus tard, être utile pour comprendre certains éléments fondamentaux du temps) mais il présente aussi des problématiques liées à l'*émergence*, ainsi qu'à la notion de *Temps* et d'*historicité*. En outre, le concept d'entropie semble très prometteur pour l'analyse des rapports entre objets de différents niveaux d'organisation et leur réduction éventuelle (rapport micro/macro). En effet, on essaie de comprendre les mouvements observables (au niveau macro) par l'analyse des dynamiques inobservables (au niveau micro) ; ces niveaux sont d'ailleurs inclus dans le formalisme de la mécanique statistique. En outre, la vie semble être un phénomène thermodynamique assez particulier, dans la mesure où les êtres vivants sont des systèmes qui luttent contre l'entropie et l'équilibre thermodynamique : en approfondir les implications sur le sujet de l'émergence de la vie semble approprié. En effet, historiquement, comment est-ce que la matière a pu acquérir cette capacité à lutter contre l'équilibre dynamique ?

A partir de cette notion d'*historicité*, nous explorerons un principe directement lié à cette thermodynamique : le concept de *Flèche du Temps*. Pour cela, il s'agira aussi d'explorer nos conceptions du *Temps*, en mécanique classique puis selon les modèles actuels : comment le Temps peut-il être compris par rapport à une ontologie fondamentale telle que décrite au fil de notre travail ? Ce principe de la Flèche du Temps nous aidera donc à explorer la problématique de l'émergence du vivant, cette fois-ci sous un angle diachronique. En effet, la notion de temps et d'émergence diachronique recèle de problématiques complexes, et permet à de nombreux défenseurs de l'émergence de justifier une autre forme d'indépendance ontologique : celle des systèmes complexes évolutifs.

En fait, à partir de cette vision cosmologique articulée sur l'émergence de phénomènes complexes, des théories liées à *la complexité*, *l'information* et *la néguentropie* ont fait leur apparition, que nous étudierons dans cette troisième phase. Ces théories semblent aussi revendiquer une ontologie nouvelle, cette fois en se basant fortement sur le principe diachronique de l'évolution du vivant. Il s'agira donc, sous l'angle du physicalisme et de la métaphysique naturelle développée jusqu'à présent, de voir si ces éléments peuvent être intégrés dans la structure dynamique de l'univers et son fonctionnalisme structurel, ou s'ils participent vraiment à l'émergence d'une ontologie originale et nouvelle.

En somme, ces analyses permettront d'étudier jusque dans quelle mesure il peut nous être utile de faire un lien entre physique et biologie, à propos du moment de l'émergence de la vie. A partir de ce constat, il s'agira d'approfondir la notion d'émergence diachronique du vivant : la thermodynamique semble induire une direction du temps et des phénomènes physiques, direction représentée par la Flèche du Temps. Ce temps semble participer à l'apparition de certaines formes de *complexités* (*Flèche de la Complexité*, *notion d'information et néguentropie*), à partir de laquelle des chercheurs tentent de revendiquer un statut ontologiquement nouveau à la vie.

5.1 Inobservabilité et Thermodynamique

Dans la partie précédente sur les systèmes complexes, les critères d'*inexplicabilité* et d'*imprévisibilité* constituaient des arguments contre le réductionnisme, en faveur de l'émergentisme des systèmes complexes. En thermodynamique, on observe un autre critère, celui de « l'inobservabilité », ce dernier correspondant en opposé à « l'observabilité ». En fait, bien que l'on ne sache pas établir exactement la dynamique moléculaire (inobservable) précise par exemple d'un gaz, on arrive malgré tout à expliquer des phénomènes thermodynamiques (observables) : on ne peut décrire l'état, la position, etc... de chaque particule étant donnée leur quantité immense (cet état est inobservable), mais on peut en mesurer par exemple une température (cet état est observable car mesurable). Pour exemplifier historiquement, cette fois-ci à un niveau d'organisation supérieur (celui étudié par la biologie), les configurations génétiques étaient des éléments inconnus et donc considérés comme inobservables, tandis qu'ils rendaient compte de caractéristiques phénotypiques observables. De multiples théories essayaient de rendre compte de l'architecture génétique et spéculaient sur la structure de cette dernière. Par exemple Schrödinger, dans son œuvre « *Qu'est-ce que la vie ?* », imaginait que le support de cette information serait réalisé par les configurations des liaisons covalentes d'un « cristal aperiodique ». Ce n'est qu'à partir de la découverte de la molécule d'ADN par Watson & Crick en 1953, que le principe génétique fait partie des « observables » : les configurations A-T/C-G de la molécule double-hélice d'ADN constituent le génome, un code décrypté par les organites cellulaires, qui en utilisent les informations pour produire des protéines permettant ainsi le développement, le fonctionnement et la reproduction des êtres vivants. En parallèle, on remarque donc que l'avancée technique nous permet de mieux comprendre la structure dynamique de la matière, et donc de reléguer la part « d'inobservable » qu'on lui impute. Peut-être que les principes d'inobservabilité et d'imprédictibilité ne sont-ils que des concepts circonstanciés et dépendants de notre capacité technique et théorique.

Pour en revenir à la thermodynamique, si on arrive à observer des phénomènes à partir de données inobservables, c'est parce qu'il existe des liens de « *probabilités objectives fondées sur les pouvoirs causaux et ainsi des explications probabilistes du développement de la distribution des propriétés physiques fondamentales dans l'espace-temps*¹¹⁶ », comme nous l'avons relevé dans la partie traitant de la causalité humienne. Mais pour comprendre comment s'articule cette probabilité, et pour comprendre les notions principales de la mécanique statistique, faisons le point sur notre manière de comprendre la *thermodynamique* en tant que telle.

Du grec *teremein* (= chauffer) et *dynamis* (=la force, en puissance), la *thermodynamique* se développe surtout au XIX^{ème} siècle, et prend notamment son essor à partir des travaux de Carnot (un ingénieur militaire français du début du XIX^{ème} siècle), qui s'intéresse au comportement des systèmes en rapport avec la chaleur. Bien que rudimentaire (il postule l'existence du « calorique » comme substance conductrice de la chaleur), son approche pose les bases fondamentales de la thermodynamique et

¹¹⁶ Esfeld, « Les fondements de la causalité », p. 6-7.

par extension de la société industrielle occidentale (au point tel que Grinevald parlera même de « révolution carnotienne¹¹⁷ »).

La thermodynamique repose sur plusieurs principes, dont 2 très importants :

Le premier principe, dit de *conservation d'énergie* : un ensemble de systèmes (l'Univers est le plus grand ensemble de systèmes) conserve son énergie. L'ensemble ne peut ni perdre ni gagner de l'énergie : si un système gagne de l'énergie, c'est au détriment d'un autre. Cette énergie ne se crée pas, elle se transforme. Par exemple, une bûche de bois brûle : l'énergie dégagée (le feu et sa chaleur) provient de l'oxydation des molécules de la cellulose (le combustible). L'énergie contenue chimiquement dans le bois et ses configurations moléculaires est dégagée dans une réaction exothermique : la combustion. Cette énergie dégagée par la réaction n'est pas apparue de nulle part, elle était déjà présente dans le bois mais sous une autre forme !

Le second principe, dit *d'évolution et de création d'entropie* (du grec *trope* (= *transformation*) et *en* (=en dedans)) : l'entropie d'un système thermodynamique tend à augmenter jusqu'à atteindre *l'équilibre thermique*. On lie ce principe avec celui de *l'irréversibilité* des phénomènes physiques (cette notion d'irréversibilité sera centrale dans ce chapitre, car c'est autour d'elle que l'on articule notre notion du Temps en sciences). En outre, comme le montre Clausius par son choix étymologique, l'entropie est aussi très liée à la notion d'énergie :

« Je préfère emprunter aux langues anciennes les noms des quantités scientifiques importantes, afin qu'ils puissent rester les mêmes dans toutes les langues vivantes ; je proposerai donc d'appeler (cette) quantité l'entropie du corps, d'après le mot grec η τροπή une transformation. C'est à dessein que j'ai formé ce mot entropie, de manière qu'il se rapproche autant que possible du mot énergie ; car ces deux quantités ont une telle analogie dans leur signification physique qu'une analogie de dénomination m'a paru utile¹¹⁸. »

Qu'est-ce que cela signifie, et qu'entend-t-on par entropie ? En effet, l'entropie est une notion compliquée qui a été sujette à de nombreux traitements. Jodoin nous dit deux choses à propos du concept d'entropie et de son ambiguïté : *« c'est un concept fondamental, et personne ne sait vraiment de quoi il s'agit¹¹⁹. »* Ainsi, beaucoup de théories essaient de formaliser le concept d'entropie, mais il semble difficile de le définir précisément. Prenons plutôt un exemple : si je pose un glaçon sur un radiateur chaud, on réalise que le glaçon fond. La chaleur part du chaud, et va dans le froid : la chaleur du radiateur élève la température du glaçon, et celui-ci ne peut plus rester sous forme de glace. Ce phénomène spontané allant du chaud vers le froid est irréversible : l'eau fondue ne peut plus restituer sa chaleur au radiateur dans le but de redevenir un glaçon. En outre dans ce transfert, l'entropie du système « radiateur/glaçon » augmente, jusqu'à un équilibre thermique entre ces deux corps.

¹¹⁷ Grinevald J., *La révolution carnotienne : thermodynamique, économie et idéologie*, Revue européenne des sciences sociales, no 36.

¹¹⁸ Clausius, « Sur Diverses formes des équations fondamentales de la théorie mécanique de la chaleur », 1865

¹¹⁹ Jodoin L., « L'émergence et la réalité des états compatibles inobservables : le cas de l'entropie », p. 341

D'après Boltzmann, un physicien autrichien de la seconde moitié du XIX^{ème} siècle, l'entropie peut aussi représenter une notion de « désordre ». Sans aller trop dans les détails, elle représente le désordre microscopique des particules. En fait, la matière tend à se mélanger (par exemple la crème dans le café), à se désorganiser et à prendre le plus d'espace possible (par exemple un gaz dans une pièce). Dans la mécanique statistique, l'augmentation de l'entropie, ou de ce désordre, peut être comprise de cette façon : livrés à eux-mêmes, les systèmes thermodynamiques tendent vers un état d'équilibre et s'y maintiennent. Il y a ainsi augmentation de l'entropie vers l'équilibre, puis stagnation une fois que cet équilibre est atteint. En gros, Jodoin nous résume la notion de température, qui « est représentée par l'énergie cinétique moyenne des molécules », et celle de l'entropie qui est « le logarithme d'une distribution de probabilité¹²⁰ » selon le rapport d'états microscopiques définissant l'état d'équilibre d'un système au niveau macroscopique. On voit que ce rapport statistique entre microscopique et macroscopique offre un objet d'étude pour les questions liées au réductionnisme, comme cela a été dit plus haut. En effet, il faut identifier une base fondamentale (micro) pouvant offrir des règles expliquant les états macros, ainsi que des « bridge-laws » reliant les deux théories : se présente aussi le problème des réalisabilités multiples où des entités de niveau macro peuvent être réalisées de plusieurs façons différentes par des entités micro. Comme abordé au point 4.3, on constate que les *réalisabilités multiples* n'induisent pas forcément l'échec d'une réduction, mais elles peuvent garantir une forme d'autonomie explicative et épistémologique robuste par le biais d'un *fonctionnalisme structurel* basé sur des *sous-types* au niveau macro (et donc des sciences spéciales qui l'étudient), mais pas une autonomie ontologique.

S'il semble possible d'intégrer ces réalisabilités multiples dans un réductionnisme conservatif, on constate que la difficulté de comprendre les données du macro (les phénomènes thermodynamiques) par rapport aux états du micro (les états des particules) reste malgré tout très présente. En effet, cette dynamique des particules est inobservable en pratique, comme en principe. Bien sûr, on pourrait avancer que l'atomisme est considéré comme fiable, et que les physiciens arrivent à se représenter des atomes et à les détecter. Peu de scientifiques avanceraient que les atomes soient des fictions inobservées en tant que tels. Mais dans les faits, les phénomènes thermodynamiques macroscopiques impliquent des quantités gigantesques de particules (de l'ordre de 10^{23} molécules), et aucun instrument à notre disposition n'est capable de spécifier ou de déterminer l'état d'un nombre aussi grand de micro-états.

Ainsi, pour expliquer cette dynamique microscopique inobservable, on fait appel à la mécanique statistique : dans son formalisme même, des inobservables expliquent des phénomènes observables avec succès ; pour Jodoin, « *prétendre le contraire revient à saboter la stratégie explicative de cette discipline scientifique*¹²¹ ». C'est Boltzmann, entre autres, qui participera au développement de cette nouvelle science nommée *la mécanique statistique*, et qui posera ainsi les fondements théoriques pour aborder l'entropie. Pour lui, l'augmentation de l'entropie n'est plus définie de manière fondamentale, mais probabiliste : ses dimensions macroscopiques se comprennent en fonction des états microscopiques qui lui correspondent.

¹²⁰ *Ibidem*, p. 352-353.

¹²¹ *ibidem*, p. 352-353.



La formule de Boltzmann, gravée sur sa tombe au cimetière central de Vienne : S, pour l'entropie. K, la constante de Boltzmann. W, le nombre d'états microscopiques correspondant au même état macroscopique. (Photo par Daderot, wikipedia)

Pour Schrödinger, ce fossé entre le rapport micro et macro est d'ailleurs paradoxalement le mieux comblé lorsque les quantités mobilisées sont les plus grandes. Non seulement l' « *agitation thermique tout à fait désordonnée qui s'oppose, pour ainsi dire, à leur comportement ordonné (...) ne permet pas aux événements se produisant parmi un petit nombre d'atomes de se suivre d'après des lois reconnaissables,* » mais aussi « *Ce n'est que par la coopération d'un nombre énorme d'atomes que les lois statistiques commencent à opérer et à diriger le comportement de ces assemblées avec une exactitude d'autant plus grande que le nombre d'atomes impliqués est plus considérable*¹²². »

En fait, l'entropie se résume à la quantité d'états microscopiques qui correspondent à un état macroscopique. Un état « ordonné » signifie qu'il y a peu d'états microscopiques pour un état macroscopique, un état « désordonné » signifie qu'il y a beaucoup de micro-états pour le même macro-état. En résumé, pour la mécanique statistique, l'entropie dans un système thermodynamique atteint son point le plus élevé lorsqu'il existe un très grand nombre de micro-états possibles : le système y est considéré à l'équilibre. Cet état d'équilibre doit apparaître, car l'état de « désordre » est plus probable que l'état « d'ordre ». En fait, la tendance à l'équilibre se comprend par l'idée qu'un état aurait tendance à aller d'un état peu probable à un état probable, soit d'un état ordonné à un état désordonné. Par exemple, si l'on prend un jeu de 52 cartes¹²³, qu'on le dispose avec toutes les cartes face visible et que l'on considère cet état comme le plus ordonné, alors on constate que cet état ordonné ne peut exister que d'une seule façon. En effet, le macro-état « toutes les cartes face visible » ne peut exister que par $W=1$ seul micro-état », qui est précisément « toutes cartes face visible ». Par contre, si on retourne une seule carte (c'est le début du désordre), on remarque qu'il existe $W=52$ possibilités (micro-états) pour qu'il existe l'état macroscopique « une carte retournée », soit 52 possibilités de plus que l'ordre parfait précédent (bien sûr, par réciprocity, les configurations et la logique sont les mêmes si l'on désigne « ordre parfait » par « toutes les cartes face cachées », et qu'on le retourne une carte face visible). En fait, pour que le désordre soit maximal, il faudrait l'état macroscopique « 26 cartes face visible + 26 cartes face cachée » : le nombre de configurations microscopiques possibles pour cet état serait du coefficient binomial de 26 parmi 52 (ou la combinaison de 26 parmi 52) soit $W = 4,96 \times 10^{14}$! Cet état d'équilibre (dans cet exemple l'état « 26 cartes face visible + 26 cartes face cachée ») serait donc le plus probable au niveau macro, étant donné le grand nombre de configurations W possibles pour l'obtenir au niveau micro.

¹²² Schrödinger, *Qu'est-ce que la vie ?*

¹²³ Pour la métaphore avec le mélangeur de cartes, voir SMOLIN L., *La renaissance du temps, pour en finir avec la crise de la physique*, éditions Dunod, Paris, 2019.

Ainsi donc, lorsqu'on calcule l'entropie d'un système, on évalue seulement le niveau macroscopique, puisqu'il n'est pas possible d'observer le niveau microscopique. Il s'agit d'une approche *coarse-grained* (comme vu plus haut dans le chapitre 4.2). On a vu qu'il est très probable qu'un système évolue vers un état d'équilibre (pour le jeu de 52 cartes, $W = 4,96 \times 10^{14}$), et improbable que son entropie diminue. En fait, la probabilité que cela se produise est tellement faible qu'on avance donc la notion d'*irréversibilité*. Mais Henri Poincaré (un mathématicien et physicien français contemporain à Boltzmann) contredit cette irréversibilité par son *théorème de récurrence*, qu'on peut énoncer ainsi : « *tout système macroscopique repasse une infinité de fois aussi près que l'on veut de son état initial* », ce qui implique la *réversibilité* des systèmes, en opposition à l'*irréversibilité* de la thermodynamique. En réponse¹²⁴, Boltzmann calcule le temps nécessaire à un volume de 100cm³ de gaz pour revenir à son état initial : il faut 10²² (10 itérée par 2) ans soit un nombre d'années gigantesque, plus élevé que l'âge admis de l'univers. Ainsi, s'il est possible au niveau des probabilités que le café et la crème versés dans la même tasse se resépare, la probabilité en est tellement infime qu'on part du principe que ça n'arrivera pas. Caroll nous dit :

« *when you run the numbers, it turns out that the time you would have to wait before expecting to see such a fluctuation is much larger than the age of the universe. But its there*¹²⁵. »

Cette possibilité est donc hautement improbable ! l'entropie semble effectivement augmenter partout où on observe l'univers. Mais si la tendance est vers cette augmentation, comment expliquer que l'univers soit en pente constante vers le désordre en partant d'un état plus ordonné ? En effet, un état de basse entropie est improbable, pourtant nous sommes actuellement dans un état plus ordonné que le prochain état. Si l'état va vers le désordre, c'est qu'il était à un moment $t-1$ plus ordonné qu'à un moment $t+1$.

On voit donc que *le passé* devrait logiquement être plus ordonné que *le présent* ou *le futur*. Pour désigner ce constat, des physiciens ainsi que des philosophes ont stipulé l'*hypothèse du passé*. Selon cette hypothèse, l'entropie du passé a été plus basse que celle d'aujourd'hui, et elle n'a fait qu'augmenter à partir d'un état de *très basse entropie* : c'est une des seules manières de faire en sorte que le mécanisme de l'entropie soit logique par rapport à notre compréhension et à notre expérience de l'univers (il existe bien entendu d'autres alternatives au postulat de l'Hypothèse du passé, telles que la théorie de Rovelli¹²⁶, mais nous ne les aborderons pas afin de ne pas sortir du cadre de la présente étude). Ainsi, bien que l'état de basse entropie soit atypique et improbable, il nous semble nécessaire d'en faire appel pour caractériser l'état initial de l'Univers.

Ainsi donc, on remarque que la notion d'entropie est surprenante : constatée au départ dans les calculs de Carnot et formulée comme une perte systématique de la part d'énergie utile à l'exercice d'un travail dans un système dans le temps, elle est passée dans les mains de la physique statistique et de la mécanique probabiliste par les études

¹²⁴ Boltzmann L., « Entgegnung auf die wärmetheoretische Betrachtung des Herrn Zermelo », in *Annalen der Physik*, vol. 57, 1896, p. 773

¹²⁵ Caroll, S. *From Eternity to Here, the Quest for the Ultimate Theory of Time*, Dutton, USA, 2010, p. 62.

¹²⁶ Auteur de la théorie quantique à boucles.

de Boltzmann (avec le concours de bien d'autres ingénieurs ou scientifiques), jusqu'à devenir un élément crucial dans notre compréhension du temps qui passe en tant qu'élément scientifiquement indétectable : il s'agit d'une tendance de l'univers à aller d'un état ordonné vers un état désordonné. Cette tendance implique une notion de direction dans le temps, allant ainsi de l'ordonné vers le désordonné : c'est la flèche de la thermodynamique, qui peut aussi suggérer une direction dans le temps.

5.2 Auto-organisation et émergence dans les systèmes dynamiques

Mais quel rapport y a-t-il entre la vie et la thermodynamique ? On a vu dans la partie précédente des systèmes complexes autoorganisés et fonctionnant selon des niveaux d'organisations différents. Mais c'est en faisant entrer en jeu la variable *temps* que les phénomènes d'émergence sont les plus impressionnants et déroutants. Et parmi ces systèmes complexes, ceux qui retiennent notre attention sont ceux qui non seulement évoluent dans le temps, mais qui en plus défient la conception du temps liée à la thermodynamique : ils fonctionnent loin de leur équilibre thermodynamique. Malgré le fait qu'ils se maintiennent en dehors de cet équilibre, ils arrivent à produire des structures et des objets stables et autoorganisés. Mais est-il seulement concevable de s'opposer ainsi au second principe de la thermodynamique ? Dans son livre *The Nature of the Physical World*, Arthur Eddington (1882-1944) nous dit : « *If your theory is found to be against the second law of thermodynamics, I can give you no hope ; there is nothing for it but to collapse in deepest humiliation.* » Ainsi, il est important de comprendre comment les systèmes vivants s'accommodent de ce second principe.

C'est I. Prigogine (1917-2003) qui le premier a fait remarquer que les systèmes éloignés de l'équilibre thermodynamique opéraient selon des équations non-linéaires, et qui a développé tout un champ de recherche concentré sur ces « structures dissipatives ». Mais pourquoi ces structures semblent-elles stables malgré leur état éloigné de l'équilibre thermodynamique ? En fait, en thermodynamique « classique » les transferts d'énergies (friction, transfert de chaleur etc...) sont considérés comme des pertes, du gaspillage. Mais dans les structures dissipatives de Prigogine, ces dissipations deviennent paradoxalement des sources d'ordre. Selon lui, ces structures dissipatives non seulement se maintiennent à un état stable, mais elles évoluent aussi dans le temps. Et en fonction des ajouts d'énergie ou de matière, ces systèmes s'adaptent en faisant émerger des structures nouvelles et plus complexes, descriptibles selon la théorie du chaos. Capra & Luisi résumant : « *In the language of nonlinear dynamics, the system encounters bifurcation points at which it may branch off into entirely new states, each characterized by a specific attractor, where new structures and new forms of order emerge*¹²⁷. » Dans son analyse détaillée des systèmes (perturbés ainsi par des ajouts d'énergie/matière), Prigogine montre que les stabilisations vers des organisations nouvelles sont le fruit de mécanismes de rétroaction et d'auto-organisations. Et ces mécanismes complexes se retrouvent à tous les niveaux organisationnels de la vie biologique.

Le tour de force de Prigogine a été de réconcilier les visions contradictoires qu'on avait des systèmes physiques et biologiques. En effet, les systèmes physiques ressemblent à des « moteurs qui s'éteignent dans le temps », tandis que la vie

¹²⁷ Capra & Luisi, *The Systems View of Life*, p. 159.

biologique semble se déployer et évoluer dans le temps¹²⁸. Dans sa vision, Prigogine ne nie pas le second principe de la thermodynamique, mais parvient à redéfinir la vision de la thermodynamique pour y inclure les éléments propres aux systèmes vivants. L'entropie augmente toujours, mais dans le monde biologique, l'ordre et le désordre sont créés simultanément. Selon lui, « *dissipative structures are islands of order in a sea of disorder, maintaining and even increasing their order at the expense of greater disorder in their environment*¹²⁹. » Par exemple, un organisme prélève de la nourriture dans son entourage (de l'énergie) puis la rejette sous formes de déchets (de l'énergie est dissipée). Ainsi, « *order floats in disorder* » : le second principe de la thermodynamique est sauvegardé puisque le système pris dans sa totalité (l'univers) tend vers le désordre. Simplement, dans les structures émergentes diachroniques, un « emprunt d'ordre » est fait à l'univers sous forme énergétique pour constituer des systèmes fonctionnant selon une logique différente ; mais cet emprunt est payé d'une manière ou d'une autre de façons à ce que la somme globale soit conforme au second principe de la thermodynamique. Ainsi, les développement et l'évolution des systèmes biologiques fonctionnerait sur des formes particulières d'émergence diachronique, qui seraient « différentes » des formes « classiques, mais qui respecteraient malgré tous les principes de la thermodynamique. Mais pour les comprendre, il faut se pencher sur la notion de temps.

5.3 Le Temps, être et devenir

Pour mieux comprendre les enjeux de notre vision à propos du temps en tant que tel, revenons brièvement à la physique classique. D'un point de vue de la mécanique classique, donc, la physique s'est élaborée sur des théories dont les modèles ne traitent pas du devenir temporel. La variable *temps* de nombreuses équations peut être permutée de t à $-t$: la cohérence du système demeure, le temps n'est qu'un paramètre que l'on peut changer à sa guise. On dit de ces lois qu'elles sont *invariantes par inversion du temps*. En conséquence, il est possible de prédire, comme le démon de Laplace, à la fois le futur à partir du passé, et le passé depuis le futur. Mais, on constate que l'entropie, telle que stipulée plus haut (partie 5.1) par le 2eme principe de la thermodynamique, semble être en contradiction avec ce principe de mécanique classique *d'invariance par inversion*, car cette entropie présuppose justement la notion d'*irréversibilité*. Nous avons vu que les probabilités et les statistiques pouvaient pondérer ce principe d'irréversibilité, mais il n'empêche que les configurations atypiques des systèmes semblent improbables au point qu'on puisse les mettre de côté. Alors comment comprendre ce principe *d'irréversibilité dans le temps*, et que signifie vraiment donc ce *Temps* ? En effet, les sciences spéciales font appel au Temps, et la biologie moderne est construite sur la notion d'évolution des espèces. En outre, l'émergence diachronique de certains systèmes complexes repose aussi sur la notion de *temps*, il faut donc comprendre ce que l'on entend par *temps*, et voir s'il est possible de le relier à un principe d'ordre physique. En effet, aucun principe de la physique classique ne prouve l'existence du temps ou d'une direction de celui-ci, pourtant il semble se manifester à nos yeux ou à nos impressions, et on l'invoque dans nos équations portant sur le monde. S'il est possible d'intégrer le déroulement du temps, d'une manière ou d'une autre, aux conceptions ontologiquement réductionnistes, alors

¹²⁸ *Ibidem*, p. 159.

¹²⁹ *Ibidem*, p. 159.

on peut espérer contenir les postulats émergentistes basés sur la part diachronique du monde : il faut donc cerner ce concept, avant de l'invoquer dans des visions du monde.

Par sens commun, il semble aller de soi que le temps existe, qu'il s'écoule du présent vers le futur, et qu'il s'est écoulé du passé jusqu'au présent. Le passé semble "passé" et donc déjà effectué et inaccessible ; de plus il semble recéler des raisons pour lesquelles le présent est ce qu'il est. Le futur, quant à lui, ne semble pas encore réalisé : c'est le lieu des possibilités sur lesquelles on peut encore agir. On remarque, par exemple, que le chat a fait tomber un vase sur le sol il y a 5 minutes, et que ce dernier s'est brisé. On le constate à l'instant, et immédiatement on se projette : je devrais aller chercher une ramassoire afin de récupérer les morceaux, sinon quelqu'un pourrait à l'avenir se blesser sur les débris... Le vase semble brisé pour toujours, c'est un fait accompli. Par contre, je peux encore décider d'aller ramasser les débris, ou je peux décider de quelle manière je veux le faire. Le passé est révolu, et le futur semble plein de possibilités. Ainsi, c'est l'expérience que l'on fait du temps dans la vie de tous les jours qui en conditionne notre compréhension, et on passerait pour fou en prétendant qu'il en serait autrement : le temps semble exister, et il semble s'écouler dans une direction bien distincte.

Pourtant, dès que l'on s'essaie à la tâche de l'expliquer ou d'en proposer une définition stricte, on se heurte à des difficultés. Ainsi, Saint Augustin disait à propos du temps, il y de nombreux siècles :

"Qu'est-ce que le temps ? Si personne ne me le demande, je le sais. Si je veux l'expliquer à qui me le demande, je ne le sais plus"¹³⁰.

Face à cette difficulté de définir notre notion du temps par le sens commun, on peut être tenté d'aller chercher comment s'articule cette notion dans les sciences, car ces dernières en font systématiquement usage. En effet, par exemple en biologie, tout l'édifice épistémologique qui a trait à la théorie de l'évolution et au néo-darwinisme fait référence au temps dans ses descriptions de processus, comme mentionné plus haut. La sélection naturelle s'opère effectivement dans le temps : au sein d'une espèce, la transmission des allèles et des gènes se fait par reproduction, (l'ancêtre précède le descendant) tandis que la sélection s'opère par la « confrontation » entre le *fitness* des individus (ou des groupes d'individus) et leur environnement respectif. La transmission des gènes se fait par reproduction dans le temps (les descendants héritent des gènes de leurs parents), la sélection naturelle s'opère dans l'environnement en fonction du temps, et on peut dire que ce *temps* a une direction allant du passé vers le futur. En résumé, la biologie est donc une science spéciale qui doit composer avec une vision diachronique, elle doit donc s'articuler sur un facteur de temps, et ce temps a une direction (du passé vers le futur).

Pour ce qui est de la cosmologie dans son modèle standard, on dit en gros que l'univers a une histoire, que cette dernière débute à partir du *Big Bang* (ou à partir du mur de Planck, plus précisément), il y a environ 14 milliards d'années. Ces échelles temporelles semblent vertigineuses : comment se positionner au sein de celles-ci ? De plus, quels liens la matière entretient-elle avec le temps ? En effet, nous ne pouvons pas « sortir » du temps pour l'étudier comme un objet. Nous faisons directement partie de l'Univers et du temps : nous devons le comprendre de l'intérieur.

¹³⁰ Saint Augustin (IV-Ve siècle ap. J.-C.), *Les Confessions*, Livre XI.

5.4 Le Temps dans les sciences : flèche du temps et hypothèse du passé.

Nous allons donc nous focaliser brièvement sur deux paradigmes ayant eu beaucoup de succès historiquement : la vision du temps newtonienne ainsi que la vision d'Einstein. Pour Newton, le temps et l'espace sont absolus. Ils existent indépendamment de la matière inerte, et sont les mêmes pour tous les observateurs, quels que soient les endroits où ils se trouvent dans l'univers. Ce temps s'écoule uniformément, et il s'écoule dans le même sens :

« Le temps absolu, vrai et mathématique, sans relation à rien d'extérieur, coule uniformément, et s'appelle la durée. (...) Le temps absolu doit toujours couler de la même manière¹³¹ »

Pour ainsi dire, le temps et l'espace absolus sont pour Newton des éléments de son ontologie primitive : ils sont inaliénables, infaillibles et irréfutables comme étant absolus pour chaque référentiel. Ils forment une espèce de « contenant » pour tous les objets de l'univers, et ne nécessitent rien d'externe pour justifier leur existence.

En fait, cette vision Newtonienne est en porte à faux avec la vision d'Aristote. En effet, pour ce dernier le temps n'a pas de réalité distinguable : le passé n'est plus, l'avenir n'est pas encore, et le présent est à l'intersection de ces deux parties. Il dit dans sa *Physique* : « de même que le cercle est au même point pour ainsi dire concave et convexe, ainsi le temps aussi est toujours un commencement et une fin, et pour cette raison il semble toujours autre¹³². » En fait, Aristote défend une vision relationniste, dans laquelle le temps est dépendant de la matière et sert à en mesurer le mouvement :

« Puisque le temps est mesure du mouvement et du mouvement en train de se produire, et qu'il mesure le mouvement en déterminant un certain mouvement qui servira d'unité de mesure pour le tout - de même que la coudée mesure la grandeur par la détermination d'une certaine grandeur qui sert d'unité de mesure pour le tout - ainsi, pour le mouvement, le fait d'être dans le temps, c'est le fait d'être mesuré par le temps, quant à lui-même et quant à son existence ; c'est à la fois, en effet, que le temps mesure le mouvement et l'existence du mouvement, et tel est pour le mouvement le fait d'être dans le temps : le fait que son existence soit mesurée¹³³ »

On observe donc déjà durant l'Antiquité des théories liant de manière forte les notions de temps et de matière.

Pour Einstein, le temps n'est plus absolu. En 1915, il développe sa théorie de la théorie générale dans laquelle il affirme la non-simultanéité de l'univers : il réunit l'espace et le temps en une seule entité. Ce nouveau concept, *l'Espace-Temps*, est dynamique et n'est plus un contenant pur et absolu pour la matière : il entre en relation directe avec elle. Pour chaque observateur et pour chaque référentiel, le temps est observé différemment en fonction de sa vitesse ou de son emplacement. Ainsi, le temps ne s'écoulerait pas de la même manière pour un individu aux abords d'un trou noir que

¹³¹ Newton, *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*, t. I et II, Lambert, Paris, 1759

¹³² Aristote, *Physique*, IV, 10-14, 222 a28 – 222 b7

¹³³ *Ibidem*, 220 b2 – 221 a7

pour un individu assis en salle de classe à l'Anthropole. Le « même » présent et le sentiment de « simultanéité » ne peut être partagé que par les observateurs placés dans le même référentiel : le temps est local. Les notions de futur ou de passé ne sont donc pas des absolus universels simultanés partout : selon la théorie d'Einstein, nous sommes liés à notre cône de lumière.

Mais il existe une autre manière de concevoir le temps, comme nous l'avons vu plus haut : en se basant sur la thermodynamique, il est possible d'induire une forme de direction du temps qui tiendrait compte des phénomènes d'irréversibilité que l'on observe dans la vie de tous les jours. Il y a de nombreuses manières de concevoir cette direction. Maudlin¹³⁴ avance par exemple que la nature directionnelle du temps lui est intrinsèque et fondamentale, tandis qu'Albert¹³⁵ avance, avec son *Mentaculus*, que la nature du temps n'existe pas en soi et qu'il ne possède pas de direction intrinsèque : seules comptent les conditions initiales de l'univers (hypothèse du passé) et les lois de la thermodynamique. Il est difficile de trancher, mais on remarque que le lien entre temporalité et irréversibilité semble prometteur dans la compréhension que l'on peut avoir du temps en tant que tel. Mais selon Esfeld, « *On peut aller jusqu'à dire que les conditions initiales spéciales de l'univers sont à l'origine de la direction du temps. Toutefois, rien dans l'hypothèse du passé ne nous force à tirer cette conclusion : on peut aussi maintenir que le temps s'écoulerait même s'il n'y avait pas de processus irréversibles dans l'univers*¹³⁶. » En fait, la flèche du temps est un très bel outil conceptuel pour expliquer l'asymétrie des événements et on peut l'ajouter aux lois physiques pour qu'elles soient dirigées et qu'elles s'actualisent comme elles le font. En effet, sans la flèche du temps, il nous est difficile de différencier et de comprendre les entités au sein du monde physique, par leur mouvement par exemple comme le dit Aristote.

Cette flèche thermodynamique permettrait donc d'établir une flèche du temps selon un rapport statistique, comme décrit plus haut. On pourrait de cette façon établir un mouvement et une direction dans le temps par une suite d'événements qui seraient plus probables que d'autres : plus il est improbable, plus il est relié au passé et ordonné (selon l'hypothèse du passé) tandis que plus il est probable, plus il est relié au futur désordonné. Par contre, on remarque que cette flèche thermodynamique n'est pas éternelle : lorsque l'univers atteint son équilibre thermodynamique, alors tout s'arrête.

Ce pessimisme, par rapport à la mort thermique de l'univers, a déjà été remarqué en 1854 par von Helmholtz H. (1821-1894), lorsqu'il affirme que le second principe de la thermodynamique doit nécessairement faire tendre l'univers vers le chaos. En effet, bien que comme dit plus haut au point 5.2 il soit possible que des « îlots » d'ordre apparaissent dans des régions précises de l'univers (par exemple un cristal émergeant d'un soluté, ou la naissance d'un être vivant etc...), cette apparition se fait toujours sur un coût compensé ailleurs, si bien que la somme globale d'entropie dans l'Univers doit toujours augmenter. Ainsi pour Helmholtz, la quantité globale d'entropie augmente toujours, et l'univers devrait atteindre un point d'équilibre thermodynamique durant lequel il ne pourra plus rien se passer de notable. C'est la fameuse « *heat death of the universe* »¹³⁷ Cette vision pessimiste, nihiliste et pourtant scientifique a beaucoup agité le monde intellectuel lors de son annonce. Sur Terre, ce

¹³⁴ Voir Maudlin T., *The Metaphysics within Physics*, Oxford University Press, New York, 2007.

¹³⁵ Voir Albert D., *Time and Chance*, Cambridge, Harvard University Press, 2000.

¹³⁶ Esfeld M., *Physique et métaphysique*, p. 129.

¹³⁷ Davies P. « Emergent Complexity, Teleology, and the Arrow of Time », in *Debating Design*, p. 191.

qui nous évite de trop vite « sombrer » dans le chaos entropique, c'est principalement l'énergie du soleil : par rayonnement de chaleur et grâce à la photosynthèse, la vie terrestre parvient à transformer suffisamment d'énergie pour se maintenir et croître. Mais viendra un moment où cette énergie ne sera plus disponible, ce qui est source d'angoisse pour beaucoup de monde : plus l'univers devient compréhensible, plus il devient insensé. Atkins condense bien cette angoisse en ces termes :

« We have looked through the window on to the world provided by the Second Law and have seen the naked purposelessness of nature. The deep structure of change is decay; the spring of change in all its forms is the corruption of the quality of energy as it spreads chaotically, irreversibly and purposelessly in time. All change, and time's arrow, point in the direction of corruption. The experience of time is the gearing of the electrochemical processes in our brains to this purposeless drift into chaos as we sink into equilibrium and the grave¹³⁸. »

Bien entendu, il n'est pas nécessaire de paniquer maintenant puisque l'hypothétique mort thermique de l'univers ne se produira pas avant des milliards et des milliards d'années ; pourtant il est intéressant de voir à quel point l'élaboration de notre *vision scientifique du monde* peut influencer l'état d'esprit et la vision personnelle que l'on peut se faire de l'univers. On revoit à nouveau à quel point la quête de vérité scientifique est harnachée à notre quête de vérité moral et de sens dans notre vie individuelle comme le soulignait Poincaré : nos conceptions sur le devenir et l'être du monde influencent notre manière d'aborder nos vies respectives. Par ailleurs, pour revenir au point 5.2, on note qu'il existe des systèmes complexes qui défient l'équilibre thermodynamique : quel est le rapport avec la flèche thermodynamique et l'augmentation de l'entropie, et pourquoi sont-ils en complexité toujours croissante ?

Il existe encore une autre alternative de comprendre le temps, il s'agit cette fois de la flèche de la complexité, calquée sur la gravité. Selon J. Barbour, T. Koslowski et F. Mercati¹³⁹, il est possible de penser la flèche du temps sans nécessairement faire appel à l'hypothèse du passé. Cette théorie part du principe que l'univers tend vers une forme de complexité toujours croissante : de l'état de « soupe de plasma » primitive, l'univers se serait ordonné en galaxies, systèmes solaires etc... Mais comment lier cela avec le second principe de la thermodynamique ? Pour ce faire, une idée populaire voudrait s'intéresser à la gravité : la matière de l'univers tendrait vers l'ordre tandis que le champ gravitationnel verrait son entropie augmenter, ce qui compenserait le tout. Selon le modèle de Mercati, il y aurait une croissance irréversible de complexité dans ses solutions : la notion de temps serait dépendante de cette complexité. Ainsi, il existe plusieurs manières de comprendre le temps : bien qu'on en fasse l'expérience, il est difficile d'avoir un consensus sur la manière de l'appréhender. Mais ces manières tentent de l'intégrer dans des modèles scientifiques et physiques qui essaient au maximum de l'intercaler parmi les concepts de la structure dynamique du monde. On voit ainsi que le temps en tant que tel peut être compris d'une manière scientifique et fondamentalement liée aux sciences physiques. Il s'agira, dans la suite, de voir si les dynamiques et les processus de l'émergence diachronique s'inscrivent ainsi aussi dans ces conceptions scientifiques. En effet, la donnée temporelle doit bien, d'une manière ou d'une autre, être incorporée de manière logique et cohérente dans notre vision

¹³⁸ ATKINS P., « Time and Dispersal : the Second Law », in *The Nature of Time*, ed. Raymond Flood & Michael Lockwood, Oxford, Basil Blackwell, 1986, p. 98.

¹³⁹ Barbour J., Koslowski T. & Mercati F., « A Gravitational Origin of the Arrow of Time », Waterloo, Canada, 2014.

scientifique du monde, sinon l'aspect diachronique des processus émergents échapperait, par sa donnée diachronique, au principe de complétude de la physique.

5.5 La complexité, la néguentropie, et la téléologie en biologie – l'émergence Diachronique

Intuitivement, il semble évident que la vie biologique soit spéciale. On la voit grouiller, guérir, lutter, croître dans l'espace et dans le temps, tandis que la matière inerte ne fait rien de tout ça. Contrairement à la plupart des systèmes physiques qui ressemblent à des « moteurs qui s'éteignent » dans le temps comme dit plus haut, les systèmes biologiques luttent d'une part contre leur équilibre thermodynamique, mais évoluent et se complexifient dans le temps d'autre part. Pour Schrödinger, ces systèmes vivants sont caractérisés par un haut état d'ordre, qui survivraient en puisant de la « néguentropie » dans leur environnement. Pour lui, cette « néguentropie » fait référence aux formes utilisables d'énergie que les êtres vivants pourraient utiliser, tel que le rayonnement solaire ou les complexes moléculaires riches en énergie (les sucres, etc...). Le processus de la « vie », comme tout autre système dans l'univers, augmente la quantité d'entropie dans l'univers : « *Ever compare a five-course meal with the ensuing excrement ? something has been lost.*¹⁴⁰ » Ainsi, la vie « tricherait » en puisant sa nourriture dans des sources de néguentropie pour permettre ses développements. En fait, on essaie de faire correspondre le temps avec l'irréversibilité, et par là avec les phénomènes entropiques, mais on remarque que certains systèmes complexes (dont ceux du vivant) luttent contre cette tendance au désordre. Le temps ne s'inverse pas par eux, bien entendu, mais on note que l'ordre créé par les structures vivantes est en porte-à-faux avec la tendance au désordre des systèmes physiques. Mais malgré cet « emprunt » d'ordre, la somme totale de l'entropie de l'univers continue toujours à augmenter, car le prix est payé ailleurs.

La complexité doit donc nécessairement se payer, d'une manière ou d'une autre, par de l'augmentation de l'entropie. Ainsi, les flèches de la complexité et de l'entropie, bien que décrivant des tendances inverses (augmentation du désordre des systèmes physiques pour la flèche de la thermodynamique (entropie) et augmentation de l'ordonnancement des systèmes complexes pour la flèche gravitationnelle (ou de la complexité)), s'accordent nécessairement avec le second principe de la thermodynamique, comme dit plus haut. Ces deux aspects, mis en évidence par respectivement la flèche thermodynamique et la flèche de la complexité, semblent difficile à expliquer. En effet, les systèmes organiques sont faits des mêmes « briques » que les systèmes physiques ; ils semblent de la même matière que celle que l'on trouve partout ailleurs dans l'univers. Pourtant, leur comportement est spécial et différent dans le temps. Les théoriciens de la complexité, pour qui la flèche de la complexité (ou flèche gravitationnelle) semble être du pain béni, essaient de faire correspondre cette dernière à des lois physiques identifiables. Pour Davies P., « *Complexity theorists are fond of saying that they seek quasi-universal principles that would do for complexity what the laws of thermodynamics do for entropy*¹⁴¹ » : est-ce que ces lois de la complexité peuvent-elles être liées ontologiquement à des lois physiques fondamentales, ou sont-elles émergentes ? Selon lui, « *So long as there is an entropy gap, the universe*

¹⁴⁰ Wright R. *Nonzero*, p. 244.

¹⁴¹ Davies P., "Emergent Complexity, teleology and the arrow of time", p. 207.

can go on creating more and more complexity » : il semble que les phénomènes émergents diachroniques soient liés à cette hypothèse du passé et à cette flèche du temps. Mais quel lien y a-t-il entre ces notions de complexités et la physique ?

D'après Davies, c'est du côté de l'expansion de l'univers qu'il faudrait chercher. En effet, la brusque inflation de l'univers, et la force gravitationnelle, auraient tiré la matière hors de l'équilibre thermodynamique et permis ainsi à l'énergie et à la chaleur de « circuler », facilitant ainsi la complexification de la matière. Pour lui, « *The history of the universe is one of entropy rising but chasing a moving target, because the expanding universe is raising the maximum possible entropy at the same time*¹⁴². » Ainsi il serait possible de lier la complexité à la flèche gravitationnelle et à l'expansion de l'univers, ce qui ferait un lien possible entre les systèmes complexes vivants et la structure dynamique de l'univers. Pour résumer:

*« The rapid expansion of the universe just after the Big Bang created a huge entropy gap, which has been funding the accumulating complexification ever since, and which will continue to do so for a long while yet. This the history of the universe is not so much one of entropic degeneration and decay as a story of the progressive enrichment of systems on all scales, from atoms to galaxies*¹⁴³. »

Ainsi, il serait donc possible de trouver des causes physiques dans le déploiement de cette flèche de la complexité. En effet, l'espace-temps contient lui-même de l'énergie, ce qui nous permet de considérer les points de l'espace-temps comme des objets physiques et donc sujets à des pouvoirs causaux. Selon Esfeld :

*« Comme les structures métriques contiennent de l'énergie, à savoir l'énergie gravitationnelle, on peut les considérer comme causales au même titre que les structures quantiques d'énergie-matière non gravitationnelle : la manière dont le champ métrique interagit avec lui-même ainsi qu'avec l'énergie-matière non gravitationnelle, y compris par la production des phénomènes gravitationnels observés, est la manifestation de son caractère causal*¹⁴⁴. »

De cette manière, la flèche de la complexité est liée ontologiquement à la physique fondamentale, et elle est partie intégrante de la structure dynamique de l'univers et donc fonctionnalisable, au même titre que la flèche de la thermodynamique. Il y aurait donc un moyen de concilier ces systèmes complexes étranges, qui défient l'équilibre thermodynamique, et la complétude de la physique. En fait, la complexité et l'entropie ne seraient pas des principes contradictoires et opposés. Mais quelle part y a-t-il de contingence et de déterminisme dans l'apparition de ces systèmes ?

Comme dit plus haut (partie 3.1), il existe un débat selon lequel cette émergence serait déterministe ou non. Il semble qu'il soit difficile de trancher sur cette question, compte tenu du manque de matériel qui est à disposition, mais on sait en tout cas que cette apparition du vivant s'est produite puisque nous sommes là, et qu'elle s'est certainement produite à partir de matériaux physiques. En effet, il semble douteux d'avancer que la vie soit d'une matière différente de celle décrite par les sciences fondamentales. Mais si cette émergence est nécessaire, est-elle aussi caractérisée par

¹⁴² *Ibidem*, p. 200.

¹⁴³ *Ibidem*, p. 203.

¹⁴⁴ Esfeld, « Les fondements de la causalité », p. 9.

des causes finales et par une notion de téléologie ? Pour Lechermeier, cette émergence est inéluctable, à condition que les circonstances soient favorables, et elle se fait dans le temps :

« On théorise donc l'émergence d'une nouvelle forme de la matière s'organisant sous certaines conditions en structures autoreproductibles et qui, tout en n'étant pas totalement vivante au sens commun, n'en exhiberait pas moins les propriétés fondamentales qui l'anticipent. On décrit un processus 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) rend nécessaire le passage de la matière inorganique, minérale (au sens de la chimie minérale) à la matière organique¹⁴⁵. »

Cette émergence se ferait selon les dispositions des systèmes complexes décrits plus haut. De plus, au-delà du domaine pré-biotique, ces systèmes fonctionnent en interaction entre eux et avec leur environnement, de façons à ce qu'ils développent des dynamiques particulières, que l'on range en général parmi les modes de la théorie de l'évolution. Selon Moreno, « *Natural selection brings about a mechanism for exploring new causal relations in a much wider dimension, which will progressively make the organization of autonomous systems more complex*¹⁴⁶. » Là encore, les dispositions des systèmes et de la matière doivent compter sur un facteur temps pour se déployer et prendre leur sens ; les fonctions propres aux organismes, par rapport à leur évolution, se fait vraisemblablement dans le temps. Pour Silberstein, ces processus se feraient de manière continuiste, par une logique « *bottom-up* ». C'est pour lui une condition qui permettrait d'éviter le problème de la téléologie. Ainsi selon lui, « *nous avons donc une transition continuiste et non pas un « mystérieux » saut qualitatif – même si, en termes d'effets, un surcroît qualitatif est obtenu, ce qui est la condition de l'évolution des structures –, un processus de bas en haut et non de haut en bas, avec le bénéfice d'une élimination totale du risque finaliste*¹⁴⁷ ». Cette apparition du vivant se ferait donc selon un processus continu et logiquement articulé par les niveaux fondamentaux : en partant des particules et en les considérant comme suivant un ordre défini par leur circonstances spéciales, la vie pourrait apparaître par la propre inertie de la matière et de ses configurations, d'une manière presque spontanée. Bien entendu, il est difficile de trancher si oui ou non cela est contingent ou nécessaire, mais on sait que c'est possible puisque cette apparition du vivant s'est produite. Car en effet, les systèmes complexes mobilisés par la chimie du vivant sont tous d'ordre et de configuration physique ; leur évolution prise isolément suit des lois causales identifiables par l'appareil épistémologique de la chimie et de la physique. Ce qui pourrait rendre l'apparition du vivant contingente, c'est le fait que tous ces processus se produisent ensemble au même endroit, dans une logique et une configuration qui soit propice à l'apparition des systèmes clés du monde vivant. Et ces systèmes clés sont encore aujourd'hui sujets à spéculations : il est difficile de savoir même quelles étaient les réactions et les conditions nécessaires à l'apparition du vivant. D'où le débat, encore brûlant, de savoir si ces conditions ont été réunies d'une façon tout à fait hasardeuse, ou si ces conditions auraient nécessairement dû se « coaguler » en la vie : la complexité avec comme étape l'apparition du vivant est-elle une conséquence inéluctable de l'évolution de la matière dans le temps ?

¹⁴⁵ Lechermeier, « Penser la singularité du vivant », p. 34.

¹⁴⁶ MORENO A., « Systemic Approach to the Origin of Biological Organization », p. 266.

¹⁴⁷ Silberstein, « Introduction », p. 10.

Cette question est difficile ; pour Keller E.F. (1936- ?), rien que de se poser cette question est en soi déjà problématique : « *De combien doivent s'élever nos estimations de la probabilité de l'origine de la vie pour la qualifier d'explication physique ou pour que nous puissions au moins prétendre quelle est potentiellement explicable en termes scientifiques ?*¹⁴⁸ » En fait, cette question semble difficile à modéliser, car cette interrogation peu nous faire sortir du cadre des sciences : « *combien de billets de loterie doivent être émis pour que gagner devienne un miracle ?*¹⁴⁹ » Pour Dyson, l'univers devait nécessairement faire surgir la vie : « *In some sense the universe must have known we were coming*¹⁵⁰ ». Mais ce point de vue déterministe a son lot de problèmes. D'après Keller, le déterminisme ignore la pertinence de l'aléatoire en ce qui concerne l'origine de la vie, alors que ce champ de recherche dépend de plus en plus des outils méthodologiques de la mécanique statistique. Les réseaux booléens de Kaufman S. (1939- ?) sont un bon exemple qu'utilise Keller pour appuyer cette dernière critique car ils se servent des statistiques pour étudier l'organisation des systèmes complexes biologiques. La vie aurait une origine chaotique s'articulant autour d'une base d'équations niant toute téléologie : on en revient à la question de la téléologie. Sauf qu'à présent, on note un coup dur pour cette dernière : les besoins de fonctions sont modélisables à travers des outils mathématiques complexes et aléatoires, ce qui peut exclure la notion de « but » supérieur. Le « but » ne serait que la « fonction par rapport aux autres fonctions », s'organisant aléatoirement suivant une dynamique non-linéaire. Une question persiste cependant : les processus biologiques sont-ils du domaine de la statistique probable ou improbable ? Pour tenter d'y répondre, Keller évoque le *modèle de Barbarasi-Albert* qui opte pour des réseaux construits aléatoirement soumis à la seule règle de l'« *attachement préférentiel* ». Mais Doyle dénonce les limites de cette construction qui selon lui ne peuvent raisonnablement pas constituer un système hautement complexe. Ainsi, il semble difficile d'intégrer ces systèmes complexes dans une logique strictement déterministe.

En somme, on a vu dans ce sous-chapitre que la vie est capable de puiser de l'énergie (par exemple du soleil) afin de créer des structures de néguentropie, qui tricheraient localement avec le second principe de la thermodynamique, mais qui feraient payer un coup entropique ailleurs de façons à ce qu'universellement, le principe soit respecté. De plus, on a vu qu'en parallèle à la flèche thermodynamique se tient une flèche de la complexité, et les deux semblent être en contradiction. En fait, les flèches sont liées à l'hypothèse du passé (thermodynamique) et à l'inflation cosmique (gravitation et complexité) : les deux « se courent après ». Ces deux flèches, qui jouent un rôle dans notre compréhension de la notion de temps (notamment par le principe d'irréversibilité), sont en fait intégrables dans la structure dynamique de l'univers et sont donc fonctionnalisable : les systèmes complexes qui s'en réclament peuvent voir en fait leur émergence se faire fonctionnaliser au sein de ces dynamiques du temps. Enfin, s'est posée la question de la nécessité et de la téléologie : il semble difficile de se poser la question de manière scientifique, mais on avance que la réalité stochastique des systèmes complexes rend difficile de parler de but et par là de téléologie. Mais quelle est la base physique de cette complexité, et de l'information qu'elle porte ? quelle est la place de l'information dans la structure dynamique de l'univers ?

¹⁴⁸ Keller E.F., « Self-Organization, Self-Assembly, and the Origin of Life », p. 136.

¹⁴⁹ *Ibidem*, p. 136.

¹⁵⁰ Dyson F., *Les dérangeurs de l'Univers*, p. 250.

5.6 Systèmes complexes et information

En interagissant entre eux, ces systèmes complexes pourraient se favoriser mutuellement dans leur gestion thermodynamique. Selon Oldani R., cette gestion d'énergie est véritablement un propre des systèmes, physiques comme biologiques. Dans son cas d'étude, il propose de « *simplifier l'analyse des formes de vie en consolidant leurs innumérables propriétés en une seule, observable : le flux d'énergie.*¹⁵¹ » Il continue : « *Les organismes font office de transducteurs d'énergie. Ils absorbent l'énergie dispersée dans l'environnement, et la localisent en l'appliquant vers différentes fonctions, tâches ou buts, en tant que comportement ciblés* ». Selon England J., les entités prébiotiques comme biologiques pourraient se répliquer irréversiblement dans le but de « consommer » et « dissiper » l'énergie reçue, ce qui les adapteraient aux lois de la thermodynamique¹⁵². En fait, dans le cas des systèmes biologiques, l'évolution suivrait ce principe de « gagnant-gagnant » par ses interactions, c'est ainsi que de nombreuses fonctions biologiques pourraient être expliquées dans leur rapport fonctionnel avec les sciences fondamentales. Selon Wright, Il y aurait ainsi une forme de « *nonzero sum principle* » qui permettrait à la matière de se configurer de façons à ce qu'elle tende vers la complexité. Ainsi, lorsque la mitochondrie est « aborbée » par une cellule, leur relation devient « gagnante-gagnante » de façons à ce que leurs additions puissent entraîner une baisse de coût thermodynamique global : les systèmes des êtres vivants seraient ainsi encouragés à collaborer et à se complexifier. Mais la question est : y a-t-il une émergence, ou ces fonctions sont-elles assimilables dans le réductionnisme conservatif ? Pour Davies:

“The question is then whether the nonzero sum principle is something that augments the laws of nature or follows from them. If it augments them, whence comes this higher-level law. If it is a consequence of the laws of nature, then will such a principle follow from a random set of natural laws, or is there something special about the actual laws of the real universe that facilitates the emergence of nonzero sum interactions?”¹⁵³

Par ailleurs, cette « complexité » des systèmes à « nonzero sum » devrait nécessairement être identifiable comme dit plus haut. Pour que des organismes “acceptent” de s’allier, il faut qu’il existe des mécanismes de reconnaissance suffisants pour que le gain soit “décelable” par eux. En fait, ces configurations favorables seraient une forme d’information : il y aurait une chose détectée, et un détecteur. Par exemple, une bactérie E. Coli peut détecter si elle se trouve dans un environnement pauvre en ressources. Cette pauvreté détectée, des processus métaboliques lui font développer des flagelles, de façons à ce qu’elle se déplace jusqu’à un nouvel environnement riche en ressources. Il y a un rapport d’information entre l’environnement et la bactérie. Pour les situations gagnant-gagnant, il y aurait aussi ce rapport d’information. Cette information serait donc un élément essentiel des systèmes biologiques, et conditionnerait leurs fonctions évolutives. Pour Gatlin L.: *“Life may be defined operationally as an information processing system – a structural hierarchy of functioning units – that has acquired through evolution the ability to store and process the information necessary*

¹⁵¹ Oldani R., “Energy Transformation and flow: A theory of evolution”, p. 5.

¹⁵² England J., “Statistical physics of self-replication”, p. 1.

¹⁵³ Davies P., “Emergent Complexity, teleology and the arrow of time”, p. 207.

*for its own accurate reproduction*¹⁵⁴». Il faut bien en effet qu'elle soit "stockée" d'une façon ou d'une autre, de sorte qu'elle puisse suivre des processus évolutifs. Mais de quoi s'agit-il, que signifie le terme « information » ?

Dans la vie de tous les jours, lorsque nous utilisons le terme « information », on ne pense pas particulièrement à un support physique ou à de la matière. Il semble en effet, pour un avis de sens commun, que l'information soit plutôt une chose « immatérielle », une chose qui serait justement en dehors du monde physique. En fait, il existe des conceptions idéalistes de l'informations, ainsi que des conceptions matérialistes. A l'origine quantifiée par Shannon dans le cadre des théories du signal, « l'information » se retrouve aujourd'hui dans presque tous les domaines des sciences humaines, en philosophie de l'esprit, en logique, dans la communication etc... Le fait que ce concept soit autant utilisé dans des domaines aussi différents rend sa définition ardue. Mais il est difficile de l'imaginer sans faire recours aux théories physiques, par le biais de l'énergie ou de la matière. De plus, dans son formalisme, Shannon intègre à cette information une notion d'ordre ainsi qu'une notion de perte d'information (par exemple due à du bruit ou à d'autres perturbations). Or, cette perte est décrite par une formule mathématique extrêmement proche de celle de l'entropie thermodynamique : de nombreux penseurs ont été tentés de les rapprocher l'une à l'autre. Pour certains penseurs tels que Brillouin L., les structures conceptuelles de la thermodynamique et de l'information seraient assimilables. Mais pour d'autres, par exemple Couffignal L., cette parenté est purement fortuite : « *Revenant sur la théorie de l'information, l'application de la fonction de Shannon à la thermodynamique et à l'information est aussi un hasard de rencontre d'une même formule mathématique ; cela n'a, à mon sens, aucune signification. L'analogie qui a consisté pour Shannon à appeler cette fonction "entropie d'information" est un jeu de mots qui malheureusement a lancé sur une voie de recherches complètement fausses des centaines de mathématiciens*¹⁵⁵. » Cette intuition sera renforcée par les travaux de Landauer et Bennett, dont les conséquences sont tirées par Parrochia :

« *Il faut donc admettre que la ressemblance entre entropie et information est "purement formelle", ce qui repose sur le fait que la relation (de Boltzmann comme celle de Shannon) est une relation très générale "résultant de considérations élémentaires sur le poids à attribuer aux différents états qu'un système peut adopter de façon aléatoire*¹⁵⁶. [...] *S'il y a absence de liens réels entre entropie et information, il y a également absence de liens réels entre variations d'entropie et variations d'information. La théorie des vases communicants est donc fausse. En particulier, l'idée de Brillouin d'une variation d'entropie lors de l'acquisition d'information n'est pas justifiée*¹⁵⁷. »

Ainsi, il ne faut pas confondre l'information et l'entropie : le formalisme quasi identique ne signifie pas qu'il faille trouver un lien qui les lierait ontologiquement. Dans ce cas, quelles sont les lois qui lient physiquement la « *non-zero sumness* » de la complexité et les lois physiques, si on n'arrive pas à les lier à la thermodynamique ? En fait, cette information possède un autre lien avec la physique : celui de la matérialité et

¹⁵⁴ Lila Gatlin, citée par Bradley W. dans "Information, Entropy, and the Origin of Life", in *debating design*, p. 331.

¹⁵⁵ Couffignal L., « Information et théorie de l'information », in *Le Concept d'information dans la science contemporaine*, Cahiers de Royaumont, Gauthier-Villars, 1965, p. 351.

¹⁵⁶ Tonnelat J., cité par Parrochia D.

¹⁵⁷ Parrochia D., *Cosmologie de l'information*, Hermès, 1994, p. 39.

de l'énergie qui sert de véhicule à cette information. En effet, dans le cas des êtres vivants, une perception dans l'environnement (par exemple le marquage de territoire d'un chien, ou la détection d'une proie) induit une réaction : cet enchaînement causal peut tout à fait être identifié physiquement, de façon à ce que la complétude de la physique soit sauvegardée. Dans le cas d'une machine et des technologies de l'information moderne, c'est la même chose : les transistors, tubes électroniques ou circuits imprimés qui servaient à coder l'information en binaire lors des balbutiements de l'informatique et de la cybernétique moderne avaient une réalité matérielle évidente, tandis qu'aujourd'hui on se tourne très vite vers le « hardware » lorsque le « software » présente des problèmes. C'est parce que les données et les calculs doivent bien être stockés ou effectués physiquement et matériellement.

Par ailleurs, au niveau de la chimie du vivant, on remarque que l'information est une chose complexe, surtout si elle est spécifiée¹⁵⁸. Par exemple, si on désire décrire un cristal, il suffirait de spécifier sa substance, ainsi que la configuration de base des molécules : il suffit de deux énoncés pour décrire la structure de base, puis de l'augmenter de la directive « continuer selon cet enchaînement » afin de décrire le cristal périodique dans toutes ses itérations. Les instructions pour décrire n'importe quel polynucléotide seraient toutes aussi courtes, pour autant qu'on accepte des séquences aléatoires. Pour celui-là, il suffirait de spécifier les proportions des 4 bases de nucléotides qui devraient être incluses dans le polymère, puis d'énoncer les instructions pour qu'il soit assemblé aléatoirement. Ainsi, le cristal est spécifié mais pas complexe, tandis que le polymère est complexe mais non spécifié. Les instructions nécessaires pour former ces structures sont simples, et descriptibles en peu d'énoncés. Ce type d'instructions est ce qui s'appelle les *informations complexes spécifiées*. En comparaison, il serait extrêmement ardu de produire le même set de règles et d'instructions qui permettrait à un chimiste de synthétiser l'ADN d'une bactérie du genre d'*E. Coli*. Pour cette simple bactérie, juste le fait de spécifier sa séquence lettres par lettres serait un ensemble de 4'600'000 instructions. Il faudrait un millier de pages de descriptions pour en faire les spécifications. Ainsi, on dit que *E. Coli* a une quantité énorme d'*information complexe spécifiée*. Mais cette information reste d'ordre matériel. Elle est contenue dans les configurations moléculaires de son ADN. Même hautement complexe, cette information rentre dans le cadre de la physique, et respecte le principe de complétude de la physique.

Ainsi selon Wright R. (1957- ?), cette complexité est liée à un concept « d'information », qui lui-même surviendrait sur une base physique. Il y aurait émergence d'une nouveauté dans les configurations de la matière : l'organisation de celle-ci et ses relations en systèmes feraient émerger une forme d'information qui permettrait de « contourner » le second principe de la thermodynamique. Il dit: *“Information is what synchronizes the parts of the whole and keeps them in touch with each other as they collectively resist disruption and decay. Information is what allows life to defy the spirit, though not the letter, of the second law of thermodynamics¹⁵⁹”*. Il y aurait donc émergence de fonctions de la matière, qui contourneraient les principes de la thermodynamique : mais comment penser cette émergence au sein de la fonctionnalisation du monde ? En fait, pour lui cette information n'est pas dissociée de la matière : elle survient dessus. Il continue: *« And this information isn't some mysterious « force », but, rather, physical stuff (...) Information is a structured form of*

¹⁵⁸ Bradley W., “Information, Entropy, and the Origin of Life” p. 335.

¹⁵⁹ Wright R., *Non-Zero*, p. 250.

*matter or energy whose generic function is to sustain and protect structure. It is what directs matter and energy to where they are needed, and in so doing brushes entropy aside, so that order can grow locally even as it declines universally – so that life can exist*¹⁶⁰ ». Ainsi cette vision de la complexité semble d'un premier abord conforme à la thèse du réductionnisme conservatif : la base ontologique de la complexité reste physique, tandis que ses fonctionnalisations sont interprétables par l'étude des structures dynamiques sur lesquelles cette complexité se manifeste. En fait, ces systèmes complexes conditionneraient même leurs fonctions évolutives par cette logique de complexité, par laquelle ils optimiseraient leurs gestions de néguentropie. Chazal propose la définition suivante de l'information, en tenant compte de cette matérialité :

*« Je propose donc la définition très générale suivante de l'information : l'information est un état identifiable en tant que tel d'un dispositif physique. Cette définition appelle au moins deux précisions. 1) Dire que l'information est l'état d'un dispositif physique, c'est la lier complètement à la matérialité. 2) La seconde précision qu'il faut apporter à la définition ci-dessus concerne l'expression « état identifiable*¹⁶¹ *».*

Cette identifiabilité de l'information est au nœud d'un problème qu'il faut explorer. En effet, elle implique des êtres qui puissent identifier, comme dit plus haut avec l'exemple de la bactérie E. Coli qui « détecte » la richesse en ressource de son environnement. Pour Chazal, « l'expression « état identifiable » signifie simplement que l'information suppose effectivement un être vivant qui perçoit et utilise, même a minima, l'objet matériel comme une forme qu'il reconnaît en tant que telle. C'est le cas, par exemple, de l'animal qui repère une proie ou un prédateur et agit en conséquence.¹⁶² » C'est certainement aussi le cas d'un *ribosome* qui « reconnaît » les brins d'*ARN messenger* qu'il doit décoder pour synthétiser des protéines : il y a pour lui une information à identifier, celle des nucléotides de la chaîne ARN. Et cette information est codée dans la matière. Pourtant, selon le principe de l'entropie informationnelle, cette information ne peut que se dégrader et se perdre au fil de ses évolutions dans les systèmes ; et une machine doit nécessairement soit subir une perte, soit apporter un apport en énergie pour contrebalancer cette perte. Il y aurait là une forme de rapport entre l'entropie informationnelle et l'entropie thermodynamique, dans la mesure où un apport énergétique (thermodynamique) viendrait combler une perte en information. Selon Chazal, cette entropie informationnelle épuiserait les systèmes de la même manière que les systèmes physiques perdent leur énergie utilisable (par exemple par friction). Mais si les systèmes ne sont pas capables de produire de l'information, alors d'où vient cette information ?

Tout comme la matière peut s'autoorganiser en des systèmes non-linéaires (voir partie 5.2), pourrait-elle aussi s'organiser en support d'information génétique et « sauvegarder » des configurations structurelles favorables à son maintien dans le temps ? ce serait là une forme de robustesse. Les systèmes complexes générateur de néguentropie physique (par exemple la photosynthèse des sucres) seraient aussi générateur de néguentropie informationnelle (l'ADN, mais aussi la reconnaissance sémiotique d'une proie qui reconnaît un prédateur du coin de l'œil par une tache floue

¹⁶⁰ *Ibidem*, p. 250.

¹⁶¹ Chazal G., « La notion d'information et le matérialisme », p. 476.

¹⁶² *Ibidem*, p. 478.

et qui interprète comme une information de danger). Ainsi, les systèmes complexes du vivant pourraient faire apparaître de l'information, mais cela a un coût qui doit être prélevé dans la nature à un prix d'augmentation de l'entropie (car pour coder la matière de façons à ce qu'elle porte de l'information dans ses configurations, il faut précisément investir de l'énergie dans la formation de ces configurations). Les systèmes complexes, et la « *nonzero sum* » qu'ils arrivent à déployer seraient producteur à la fois de négentropie thermodynamique, et de négentropie informationnelle. Ainsi, selon Chazal, les êtres vivants sont sources de négentropie informationnelle, mais ils doivent se distinguer des machines classiques développées dans les années 1950, car ces dernières ne peuvent pas « inventer » d'information ; seuls les systèmes complexes et autoorganisés en sont capables :

« On peut donc penser, pour des raisons théoriques finalement assez bien confirmées dans la pratique à l'époque, que n'importe quelle machine ne peut que transmettre de l'information, au mieux sans trop de perte ; en aucun cas elle ne peut en créer, c'est-à-dire diminuer l'entropie informationnelle. Dès lors l'homme, et d'une manière générale les êtres vivants, peuvent apparaître comme des sources de négentropie (c'est-à-dire d'entropie informationnelle négative ou encore créatrice d'informations). Mais si l'homme et l'animal avec leur cerveau sont des machines, ils ne peuvent pas faire mieux que les machines artificielles qui servent dès les années 1950 de modèles de l'esprit. L'esprit-machine ne peut pas faire apparaître de l'information dans le monde¹⁶³. »

Est-ce que l'humain et le vivant surpassent-ils les systèmes-machines par leur capacité à créer de la négentropie ? En fait, des émergentistes pourraient arguer que ce postulat (que l'esprit-machine ne peut pas créer d'information dans le monde) serait un argument pour défendre un statut ontologique nouveau au profit des états mentaux, qui seraient liés à l'information : les humains seraient des créateurs d'information affranchis des limites du physique. Ainsi, en comparant une machine de Turing et un être vivant, on pourrait dire que ce dernier peut créer de la négentropie d'information, tandis que l'appareil ne le peut pas (il y aura toujours de la « friction » dans les systèmes non complexes tandis que les systèmes complexes permettraient l'émergence de l'information) ; mais cela ne nécessiterait pas forcément de saut ontologique entre le physique vers une notion émergente d'information. En effet, on a vu que les systèmes vivants pouvaient très bien créer de la négentropie, en pliant la matière sur elle-même grâce à l'énergie qu'ils tirent de l'environnement (par exemple, un organisme peut plier des configurations moléculaires par photosynthèse, afin de créer un sucre). De la même manière, les systèmes vivants peuvent plier la matière de façons à ce qu'elle renferme de l'information et des « programmes » (par exemple une séquence d'ADN, dans un système, constitue un support d'information qui peut être décodé dans des processus). Ainsi, les systèmes vivants peuvent développer des processus diachroniques complexes, qui semblent défier localement les lois de la thermodynamique ou de l'entropie informationnelle ; mais on remarque que ce qui se fait localement se paie au niveau global, car l'entropie de l'Univers augmente toujours ailleurs pour compenser ces efforts.

En somme, l'émergence diachronique des systèmes vivants et complexe peut-être reliée aux sciences fondamentales, car la notion de temps sur laquelle ils s'articulent pour revendiquer leur complexité et leur originalité est elle-même

¹⁶³ Chazal G., « La notion d'information et le matérialisme », p. 473-474.

intégrable à la structure dynamique de l'univers. Ces systèmes émergents diachroniques sont donc connectés à l'ontologie fondamentale de la matière et de l'univers. Il est donc possible de fonctionnaliser les processus d'émergence diachronique : la tendance vers la complexité se comprend comme un rapport thermodynamique mais aussi comme un rapport informationnel qui permet l'émergence de fonctions ; ces fonctions favorisent justement la capacité à gérer l'entropie des systèmes. C'est une forme de cercle vertueux. Bien entendu, il est difficile de trancher sur la téléologie de ces processus, ou d'expliquer « pourquoi » la matière suit ces cours spécifiques ; on remarque que de nombreux processus stochastiques sont à la base de ces développements, et qu'il est en conséquence difficile de parler de téléologie. Mais cette question reste ouverte, et elle conserve tout son intérêt : il n'est pas vraiment possible en l'état actuel des choses de conclure définitivement sur ce sujet.

5.7 Rétrospective du chapitre

Dans cette partie, nous nous sommes focalisés sur les aspects diachroniques du vivant et de son apparition. En effet, de nombreux systèmes émergents diachroniques se basent sur la notion de temps pour induire des principes émergentistes. Ainsi, les processus liés à la néguentropie et la tendance de la matière vers la complexité seraient susceptibles de faire émerger des notions telles que l'information. Par ailleurs, ce processus vers la complexité a été incorporé dans des visions téléologiques de l'univers. Il s'agissait donc de voir si ces principes de téléologie, de néguentropie ou d'information pouvaient justifier l'émergence d'une ontologie nouvelle.

En somme, nous avons vu que la thermodynamique et son inobservabilité n'impliquaient pas d'émergence structurelle dans ses niveaux d'organisation, et que les processus stochastiques étaient malgré tout capables de sauvegarder les principes de causalité et de déterminisme causal. Par ailleurs, cette thermodynamique constitue un pilier de notre compréhension du temps qui passe, par son principe d'irréversibilité. Nous avons vu que les systèmes complexes non-linéaires pouvaient créer des formes d'ordre et d'organisation qui semblaient défier les principes de la thermodynamique au niveau local, mais qu'ils les respectaient au niveau global. Puis, nous avons exploré la notion de temps, afin de comprendre comment il était possible de l'articuler : on remarque qu'il n'y a pas de consensus absolu sur la manière qu'il faut l'appréhender. Mais on a mis en valeur deux pistes intéressantes : la flèche de la thermodynamique, liée à l'hypothèse du passé, ainsi que la flèche de la complexité liée à la gravitation et à l'inflation de l'univers. On a ainsi pu définir un cadre physique propice à une intégration du temps dans la structure dynamique et fonctionnelle de l'univers. Par la suite, il s'agissait d'approfondir le principe de néguentropie par rapport à cette flèche de la complexité. On remarque que la matière s'autoorganise en systèmes complexes capables d'adopter des configurations qui la mettent en porte-à-faux avec l'entropie, mais que le deuxième principe de la thermodynamique est toujours respecté. Par ailleurs, la notion de déterminisme et de téléologie semble difficile à trancher : la question ne semble pas scientifique en soi ; mais il est possible de mettre en avant le caractère stochastique des mécanismes du vivant pour contredire la téléologie, sans remettre en cause le déterminisme causal. Enfin, nous avons approfondi la notion d'information, qui serait à la base des fonctionnalisations biologiques propres à la « *nonzero sum* » et aux mécanismes d'altruisme et coopération dans le monde du vivant. On constate que cette information nécessite un support physique pour ses

identifications : il n'y aurait ainsi pas d'ontologie distincte de celle de la physique fondamentale. Ainsi, les processus propres à l'émergence diachronique, tout comme ceux de l'émergence synchroniques, semblent fonctionnalisables et compréhensibles comme étant parties de la structure dynamique de l'univers. Le réductionnisme conservatif peut donc englober les émergences diachroniques.

6. Conclusion et perspective

En conclusion, nous avons vu que si le cas de l'émergence du vivant peut être compris en se basant sur des conceptions propres aux sciences fondamentales, alors notre vision du monde réel peut sembler cohérente et fondée scientifiquement. Il n'y a pas besoin de faire appel à un « élan vital » pour comprendre l'émergence de la vie. Ce phénomène d'émergence proviendrait de données physiques, certes complexes, mais qui pourraient ultimement être rapportées au niveau le plus fondamental. La conjonction de ces systèmes complexes a, certainement à un point critique particulier, déclenché l'apparition d'une nouvelle forme de système : le système vivant.

Dans la partie 1, nous avons assis les bases de notre recherche sur le principe de causalité. Ce principe, considéré d'une manière Laplacienne, laisse supposer une forme de déterminisme absolu au sein duquel aucune forme de liberté ne serait possible. Mais qu'en est-il de la liberté et de l'action dans ce cas-là ? En fait, ce principe de causalité semble être défini asymétriquement dans l'univers, si on octroie une capacité d'agent aux êtres vivants : il y aurait un « avant l'apparition du vivant », nécessaire et déterministe selon les processus de la physique, et un « après l'apparition du vivant » qui offrirait des conditions favorables pour la contingence. Pour regrouper ce principe d'intentionnalité avec la physique, on a mis en avant le principe de complétude de la physique : les intentionnalités et les comportements contingents des systèmes vivants serait causalement identifiés dans le monde physique. Par ailleurs, le principe de causalité étant critiqué par Hume et Lewis, il a fallu défendre une forme de métaphysique de la Nature : celle des pouvoirs. Ainsi, en pouvant fonctionnaliser les niveaux d'organisations de la matière, on sauvegarde les sciences spéciales dont la tâche est précisément de décrire ces niveaux tout en s'accrochant à une forme d'ontologie fondamentale d'ordre physique. Cela est condensé dans le réductionnisme conservatif ; la structure dynamique de l'univers peut être analysée selon les sciences spéciales, tandis que l'ontologie primitive s'analyse par les sciences fondamentales. Cela nous a donné un échafaudage suffisamment cohérent et robuste pour s'attaquer aux systèmes complexes de la biologie des systèmes, ainsi que leur velléité d'indépendance ontologique.

Ainsi, nous avons abordé les systèmes complexes d'un point de vue synchronique dans la partie 2. Plus précisément, nous avons pu aborder les systèmes complexes dans leurs liens de causalités réciproques et multi-niveaux, et en avons soulevés des problèmes : l'imprédictibilité, l'inexplicabilité et les réalisations multiples. Ces critiques soulevées par les tenants de l'émergentisme en faveur d'un holisme, voudraient légitimer un nouveau statut ontologique au monde à partir des systèmes complexe. Paradoxalement, ces critiques émergentistes nous ont été utiles : c'est grâce à ces considérations que nous avons pu mettre en avant la nécessité de faire appel aux sciences spéciales pour étoffer notre représentation du monde. Ainsi, nous avons pu assoir des conceptions en faveur d'un réductionnisme conservationniste : la « division du travail épistémologique » nous permettrait de produire un début de réponse à la question de quelles sont les conditions et les mécanismes liés à l'apparition de la vie ?

Enfin, dans la partie 3, nous nous sommes penchés sur l'émergence diachronique propre à ces systèmes complexes. En effet, il semble que ces systèmes

évoluent dans le temps : à la fois dans leurs échanges avec l'environnement mais aussi dans leurs relations internes. De ces évolutions émergent des formes d'organisation nouvelles de matière, qui semblaient défier les principes de la physique (par exemple la néguentropie) en s'appuyant sur une dimension temporelle. Il s'agissait donc dans une première phase de saisir ce que peut signifier ce *temps* par rapport à la structure dynamique de l'univers, afin de voir si le temps est fonctionnalisable. Puis, il s'agissait d'approfondir ces notions d'évolutions, de complexités et d'information des systèmes diachroniques. On a constaté qu'il était possible d'interpréter les éléments originaux des systèmes complexes diachroniques (la néguentropie, la complexité et l'information) par le biais de dynamiques et de structures physiques : la flèche de la thermodynamique (avec l'hypothèse du passé) et la flèche gravitationnelle (avec l'inflation cosmique). En outre, la téléologie des systèmes vivants semble difficilement tenable, de par la dimension stochastique des conditions de son développement. Les principes de la théorie de l'évolution pourraient éventuellement être liés à ces conceptions physiques de la complexité, induisant elles-mêmes plus de complexité en un cercle vertueux : « *Natural selection brings about a mechanism for exploring new causal relations in a much wider dimension, which will progressively make the organization of autonomous systems more complex*¹⁶⁴. » Il semble ainsi que les systèmes complexes diachroniques voient leurs principes d'émergence diachronique assimilables dans la structure dynamique décrite dans les parties précédentes : il est possible de les intégrer dans le réductionnisme conservatif de façon à ce que ces systèmes soient non seulement conformes à la complétude de la physique, mais étudiable selon les méthodes des sciences spéciales.

Ainsi, il semble que le phénomène d'apparition du vivant soit logiquement compréhensible selon des données de l'ordre des sciences fondamentales et spéciales, sans avoir à opérer de saut ontologique par émergence. L'émergence et ses principes serait en fait intégrée dans le réductionnisme conservatif. Mais même si l'on arrive à justifier le caractère fondamental de la vie, il n'en reste pas moins que de nombreuses questions persistent : Quelles sont les données empiriques qui corroborent une conception physicaliste de l'émergence du vivant ? Savons-nous vraiment si ce « saut qualitatif » s'est produit de manière brutale, ou si cela a été un évènement très lent et continuiste ? Quelles sont les avantages et les limites des modèles qui ont été proposés jusqu'à présent pour expliquer cette émergence ? Pourquoi et comment cet évènement a-t-il pu poser les bases des processus de l'évolution ? enfin, qu'en est-il du déterminisme et du hasard ou encore de la téléologie d'un point de vue scientifique dans notre conception du cosmos et de l'émergence du vivant ? il semble en effet utile d'allier ces conceptions pour comprendre le pont qu'a été, dans l'espace et le temps, l'incroyable passage du prébiotique au biotique. En fait, de nombreuses questions se rattachent à celle de l'origine du vivant, mais pouvoir au moins revendiquer que cette origine puisse être comprise selon des termes et des logiques propres aux sciences, nous conforte dans l'espoir d'avoir un jour des réponses. Ainsi, il est possible de rester optimiste, et comme le disait Hilbert D. cité en introduction : « *wir müssen wissen. Wir werden wissen* ».

Par ailleurs, reste encore ouvert le rapport entre le cerveau humain et la génération d'information : les systèmes complexes vivants semblent capables de créer de l'information en prélevant un coût entropique dans la nature. Mais les humains semblent se distinguer dans cette génération d'information par leur haute capacité

¹⁶⁴ Moreno A., "Systemic Approach to the Origin of Biological Organization", p. 266

d'abstraction. L'humain se distinguerait-il par des considérations spéciales telles que la conscience, ou la liberté ? C'est une question qui semble intéressante. Par exemple pour Gödel K., la question de savoir si le cerveau surpassait les machines de Turing était cruciale. En s'interrogeant sur *l'intuition mathématique* et *l'incomplétude de Gödel* (l'intuition aurait parfois produit des thèses mathématiques ne pouvant être ni démontrées, ni infirmées mathématiquement), il considère que :

- « *Soit le cerveau est une machine de Turing, et en conséquence il existe des problèmes indécidables pour l'homme,*
- *Soit le cerveau surpasse les machines de Turing, et donc l'esprit humain est une réalité indépendante du monde sensible* ¹⁶⁵»

Il y aurait selon la posture de Gödel une brèche vers une forme d'ontologie nouvelle, en provenance du vivant, à condition que l'humain surpasse les machineries de calcul mécanistes. Si l'humain peut s'extraire des considérations logico-mathématiques propres aux machines de Turing, peut-il alors être source d'une ontologie nouvelle ? Le cerveau, qui est le siège des personnes, serait ainsi capable de surpasser certaines données du monde physique, de façons à se façonner une ontologie propre. Pour une forme d'ontologie propre aux personnes (mais d'une catégorie autre que le domaine physique), voir Esfeld¹⁶⁶. Bien entendu, il s'agit là de spéculations, mais il est toujours plaisant de se poser des questions sur notre nature, puisque notre compréhension du monde ainsi que notre statut d'être humains sont intimement liés.

¹⁶⁵ Pierre Cassou-Noguès, *Les Démons de Gödel. Logique et folie*, Seuil, 2007, p. 121-123

¹⁶⁶ Esfeld, *Science et liberté*.

7. Bibliographie

Articles :

BARHAM J., « The Emergence of Biological Value », in *Debating Design*, Cambridge University Press, Cambridge, 2004, pp. 210-228.

BERGANDI, D., « Natural Selection Among Replicators, Interactors and Transactors », in *History and Philosophy of the Life Sciences*, Vol. 35, No. 2, Stazione Zoologica Anton Dohrn, 2013, pp. 213-238.

BICH L., « Complex emergence and the living organization: an epistemological framework for biology », in *philosophical and scientific perspectives on emergence*, Synthese, Vol. 185, No. 2, March 2012, pp. 215-232

BOOGERD F. & cie, « Towards Philosophical Foundations of Systems Biology : Introduction », in *Systems Biology, Philosophical Foundations*, éd. Boogerd C. & Cie, Elsevier, 2007.

BRADLEY W., « Information, Entropy, and the Origin of Life », in *Debating Design*, Cambridge University Press, Cambridge, 2004, pp. 331-351.

CLARKE A., « Energy Flow in Growth and Production », in *Trends in Ecology & Evolution*, June 2019, Vol.34, no6, pp. 502-509.

COHEN-TANNOUDJI G., « Le temps des processus élémentaires I », in *Le temps et sa flèche*, dir. Klein E. & Spiro M, Editions Flammarion, 1996.

DAVIES P., « Emergent Complexity, Teleology, and the Arrow of Time », in *Debating Design*, Cambridge University Press, Cambridge, 2004, pp. 191-209.

DODD M. & co, « Evidence for Early Life in Earth's Oldest Hydrothermal Vent Precipitates », in *Nature*, vol 543, Mars 2017, pp 60-65

DELEPORTE P., « Le matérialisme systémiste selon Mario Bunge », in *Matériaux philosophiques et scientifiques pour un matérialisme contemporain*, éd. Silberstein M., volume 1, éditions Matériologiques, 2013, pp 95-110.

ENGLAND J., "Statistical physics of self-replication", in *J Chem. Phys.* 139, 121923 , AIP Publishing LLC, California, 2013

ESFELD, *La Philosophie comme métaphysique des sciences*

ESFELD, « Les fondements de la causalité », in *Matière première*, édition Syllepse

ESFELD M., « Particules en mouvement : la conception physique de la matière », in *Matériaux philosophiques et scientifiques pour un matérialisme contemporain*, éd. Silberstein M., volume 1, éditions Matériologiques, 2013, pp 437-453.

ESFELD, *Physique et métaphysique*, EPFL Press, Lausanne, 2012.

ESFELD, *Sciences et liberté*, EPFL Press, Lausanne, 2020.

ESFELD M. & SACHSE, C., « Conservative Reductionism », in *Routledge Studies in the Philosophy of Science*, New York : Routledge, April 2011.

JODOIN L., « L'émergence et la réalité des états compatibles inobservables : le cas de l'entropie », in *Matériaux philosophiques et scientifiques pour un matérialisme contemporain*, éd. Silberstein M., volume 1, éditions Matériologiques, 2013, pp 321-366.

KAUFFMAN S., « Approach to the Origin of Life on Earth », in *Life*, 2011, 1, pp. 34-48

KAUFFMAN S. & Cie, « Quantum Criticality at the Origin of Life », in *Journal of Physics : Conference Series 626 (2015)*, 7th International Workshop DICE2014 Spacetime – Matter – Quantum Mechanics.

KELLER E., “Mapping the Future of Biology, Self-Organization, Self-Assembly, and the Origin of Life”, A. Barberousse et al. (eds), in *Studies in the Philosophy of Science*, Boston, USA, 2009

KELLER E., “Organisms, Machines, and Thunderstorms: a History of Self-Organization, part One.”, in *Historical Studies in the Natural Sciences*, vol. 38, No 1 , University of California Press, California, 2008, pp. 45-75.

KELLER E., “Organisms, Machines, and Thunderstorms: a History of Self-Organization, part Two. Complexity, Emergence, and Stable Attractors”, in *Historical Studies in the Natural Sciences*, vol. 39, No 1 , University of California Press, California, 2009, pp. 1-31.

KELLER E., « The Disappearance of Function from « Self-Organizing Systems » », in *Systems Biology, Philosophical Foundations*, éd. Boogerd C. & Cie, Elsevier, 2007.

KISTLER M., « La réduction, l'émergence, l'unité de la science et les niveaux de réalité », in *Matériaux philosophiques et scientifiques pour un matérialisme contemporain*, éd. Silberstein M., volume 1, éditions Matériologiques, 2013, pp 181-214.

LE BOUTILLER S., « Emergence and Reduction », in *Journal for the Theory of Social Behaviour*, 43 :2, 2013, pp. 205-225.

LECHERMEIER G., « Penser la singularité du vivant dans un cadre matérialiste », in *Matériaux philosophiques et scientifiques pour un matérialisme contemporain*, éd. Silberstein M., volume 1, éditions Matériologiques, 2013, pp 481-525.

LEWIS, « Causalité » (trad. Medomai), in *The Journal of Philosophy*, vol. 70, issue 17, 1973, pp. 556-567.

MAHNER M., « Le rôle du naturalisme métaphysique en science », in *Matériaux philosophiques et scientifiques pour un matérialisme contemporain*, éd. Silberstein M., volume 1, éditions Matériologiques, 2013, pp 29-70.

MORENO A., « A Systemic Approach to the Origin of Biological Organization », in *Systems Biology, Philosophical Foundations*, éd. Boogerd C. & Cie, Elsevier, 2007.

MORENO A., « Auto-organisation, autonomie et identité », in *Revue internationale de philosophie*, no 228, 2004, pp. 135-150.

NEF F., *Survenance humienne, physique et métaphysique : Disposition, structure et connexion*, in *Klesis – Revue Philosophique*, EHESS & Institut Jean-Nicod, Paris, 2012, pp- 78-103.

NUTMAN A. & co, « Rapid Emergence of Life Shown by discovery of 3700-million-year-old microbial structures », in *Nature*, vol 537, sept 2016, pp. 535-539.

ODUM H.W., “Energy Systems Concepts and Self-Organization: a Rebuttal”, in *Oecologia*, vol. 104, No.4, Springer, USA, 1995, pp. 518-522.

OLDANI R., “Energy Transformation and flow: A theory of evolution”, in *Physics Essays*, vol 19, No 4, 2006.

RICARD J., « Binding Energy and the Information Content of some Elementary Biological Processes », in *Sciences de la vie, Hypothèses et modélisation*, 324, 2001, pp. 297-304.

RICARD J., « émergence, organisation et causalité dans les systèmes biologiques », in *Enquête sur le concept de causalité*, éd. Viennot L. & Debru C., Presses Universitaires de France, Paris, 2003, pp. 179-195.

RICARD J., « What do we mean by biological complexity? », in *Biological modelling, C.R. Biologies*, 326, 2003, pp. 133-140.

ROSENBERG A. & KAPLAN D., « How to Reconcile Physicalism and Antireductionism about Biology » in *Philosophy of Science*, Vol. 72, No. 1, The University of Chicago Press on behalf of the Philosophy of Science Association, January 2005, pp. 43-68.

RUSE M., « Self-Organization and complexity in evolutionary theory, or, in this life the bread always falls jammy side down », in *Mapping the future of biology. Evolving concepts and theories*, éd. BARBEROUSSE A., MORANGE M., & PRADEU T., 2009, pp.141-155.

RUSE M., « The Argument from Design : A Brief History », in *Debating Design*, Cambridge University Press, Cambridge, 2004, pp. 13-31.

RUSSEL. “On the Notion of Cause”, 1912.

SACHSE C., « Le réductionnisme conservatif. Conserver les sciences spéciales par réduction », in *Matériaux philosophiques et scientifiques pour un matérialisme*

contemporain, éd. Silberstein M., volume 1, éditions Matériologiques, 2013, pp 247-271.

SACHSE C., « Reduction of Biological Properties by Means of Functional Sub-Types », in *History and Philosophy of the Life Sciences*, Stazione Zoologica Anton Dohrn, Napoli, vol 27, no. 3 / 4, june 2005, pp. 435-449.

SACHSE C., « What about a Reductionist Approach? Comments on Terry Horgan », in *Erkenntnis*, Springer, Vol. 67, no2, Mental Causation, Externamism and Self-Knowledge, Sept 2007, pp. 202-205.

SZATHMARY E., “The Origin of Replicators and Reproducers”, *Philosophical Transactions of the Royal Society, England*, 2006.

VALLOTTON, C. “Le statut de l’hypothèse du passé”, Unil.

VARENNE F., « Théorie mathématique des catégories en biologie et notion d’équivalence naturelle chez Robert Rosen » in *Revue d’Histoire des Sciences*, 2011.

WESTERHOFF H., « Mosaic Nonequilibrium Thermodynamics Describes Biological Energy Transduction », in *Proceedings of the National Academy of Sciences of the U.S.A.*, vol 78, no6, june 1981, pp. 3554-3558.

WESTERHOFF H. & KELL D., « The Methodologies of Systems Biology », in *Systems Biology, Philosophical Foundations*, éd. Boogerd C. & Cie, Elsevier, 2007.

WESTERHOFF H., « Thermodynamic Efficiency of Microbial Growth is Low but Optimal for Maximal Growth Rate », in *Proceedings of the National Academy of Sciences of the U.S.A.*, vol 80, no1, jan 1983, pp. 305-309.

WIMSATT W., « Aggregate, Composed, and Evolved Systems: Reductionistic Heuristics as Means to more Holistic Theories », in *Biol Philos*, 21, Springer Science, 2006, pp. 667-702.

WIMSATT W., « Complexity and Organization », in *PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, Vol. 1972 (1972), pp. 67-86.

WIMSATT W., « Emergence as Non-Aggregativity and the Biases of Reductionisms », in *Foundations of Science*, 5, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 2000, pp. 269-297.

Ouvrages :

AMEISEN J.-C., *La sculpture du vivant*, éditions du Seuil, Paris, 1999.

ANANTH M., *Bringing Biology to Life*, Broadview Press, Ontario, 2018.

AYENON I., *Approches du vivant, études d’épistémologie biologique*, l’Harmattan, Paris, 2015.

- AYALA J. & ARP R., *Contemporary Debates in Philosophy of Biology*, Wiley Blackwell, Oxford, 2010.
- BOOGERD F. & BRUGGEMAN F., *Systems Biology, Philosophical Foundations*, Elsevier, Oxford, 2007.
- BENICHOUS G., *Le chiffre de la vie*, éditions du Seuil, Paris, 2002.
- BUNGE M., *Emergence and Convergence*, Toronto, Toronto University Press, 2003
- CAPRA F. & LUISI P.L., *The Systems Views of Life*, Cambridge University Press, Cambridge, 2014.
- CALCOTT B. & STERELNY K., *The Major Transitions in Evolution Revisited*, The MIT Press, Massachusetts, 2011.
- CUNCHILLOS C., *Les Voies de l'émergence*, Belin, Paris, 2014.
- DEMBSKI W.A. & RUSE M., *Debating Design*, Cambridge University Press, Cambridge, 2004.
- DAHAN A., *Chaos et Déterminisme*, Edition Seuil, Paris, 1992.
- DUPOUEY P., *Epistémologie de la Biologie*, Editions Nathan, France, 1990.
- ESFELD M. & SACHSE C., *Conservative Reductionism*, Routledge, New York, 2011.
- ESFELD M., *Holism in Philosophy of Mind and Philosophy of Physics*, Kluwer Academic Publishers, London, 2001.
- ESPINOZA M., *Théorie du déterminisme Causal*, L'Harmattan, Paris, 2006.
- HALEVY M., *Ni Hasard, ni Nécessité*, Editions Oxus, France, 2013
- HOQUET T., *Précis de philosophie de la biologie*, Vuibert, Paris. 2014,
- HUME D., *Treatise of Human Nature*
- JAEGWON KIM, *Trois essais sur l'émergence*, trad. Mulcey M., Les éditions d'Ithaque, Paris, 2006.
- KAPLAN F., *Le Paradoxe de la Vie*, Editions de la Découverte, Paris 1995,
- KAUFFMAN S., *Investigations*, Oxford University Press, Oxford, 2000.
- LAPLACE P.-S., *Essai philosophiques sur les probabilités*, Courcier, 1814
- LECOINTRE G., *L'évolution, question d'actualité ?*, Editions Quae, Versailles. 2014,
- LETELLIER D., *La Question du Hasard dans l'Evolution*, L'Harmattan, France. 2002,

- MATTHEN M. & STEPHENS C., *Philosophy of Biology*, Elsevier, Oxford, 2007.
- MAUREL M.C., *La naissance de la vie*, Dunod, Paris, 2003,
- MAYR E., *Histoire de la biologie*, trad. Blanc M., Librairie Arthème Fayard, Paris, 1989.
- MONOD J., *Le Hasard et la Nécessité*, Edition du Seuil, Paris 1970,
- NADEAU R., *Vocabulaire technique et analytique de l'épistémologie*, Puf, Paris, 1999.
- PEAT F., *Synchronicité*, trad. Murray B., éditions le Mail, New York, 1987.
- PENROSE R., *Les deux infinis et l'esprit humain*, trad. Omnès R., Flammarion, Paris, 1999.
- POMIAN K., *La Querelle du déterminisme*, Gallimard, Paris, 1990.
- RAULIN CERCEAU F., *Les origines de la vie : Histoire des idées*, éditions ellipses, Paris, 2009.
- RICHARDS R., *The Species Problem*, Cambridge University Press, Cambridge, 2010.
- ROSENBERG A. & MCSHEA W., *Philosophy of Biology*, Routledge, London, 2012.
- RUSE M., *The Darwinian Revolution*, Cambridge University Press, 2019.
- SACHSE C., *Philosophie de la biologie, enjeux et perspectives*, Presses Polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 2011.
- SAGER H., *Le hasard et l'anti-hasard*, Vrin, Paris, 1991.
- SCARR G., *Biotenségrité*, trad. Sully, Vannes, 2015.
- SIMPSON G., *This View of Life*, Harcourt, Brace & World, inc, New York, 1947.
- STENGERS I., *Penser avec Whitehead*, éditions du Seuil, Paris, 2002.
- VIENNOT L., *Enquête sur le concept de causalité*, Presses universitaires de France, Paris, 2003.
- WALSH D., *Organisms, Agency, and Evolution*, Cambridge University Press, UK, 2015.
- WHITEHEAD A., *La science et le monde moderne*, trad. Couturiau P., éditions du Rocher, Paris 1994.